ВВЕДЕНИЕ

Электрические аппараты делятся на две группы, аппараты, номинальное напряжение которых не превышает 1000 В, относятся к группе низкого напряжения, а аппараты с номинальным напряжением свыше 1 кВ входят в группу высокого напряжения. Проектируемый магнитный пускатель относится к первой группе, так как его рабочее напряжение составляет 380 В.

Среди аппаратов низкого напряжения существует несколько обособленных разновидностей:

1. автоматические регуляторы;
2. реле и электромеханические преобразователи автоматики;
3. статические преобразователи;
4. аппараты управления;
5. аппараты, устанавливаемые в распределительных устройствах.

Электрические аппараты управления — это аппараты, которые осуществляют управление режимами работы электрооборудования на промышленных предприятиях, а также управление режимами работы распределительных сетей низкого напряжения.

В качестве контактных и токоведущих материалов в электрических аппаратах управления очень широко применяется медь или материалы на её основе. Замена медных токоведущих частей аппаратов возможна на алюминиевые, что удешевляет конструкцию, однако требует создания надежных болтовых контактных соединений алюминиевых токоведущих элементов.

Основными направлениями разработки и усовершенствования электрических аппаратов управления в промышленности сегодня являются уменьшения их габаритов и металлоемкости, а также усовершенствование технологии аппаратов и внедрение автоматизации слесарно-сборочных и контрольно-измерительных операций, где в настоящее время большая доля ручного труда.

1 РАСЧЕТ ТОКОВЕДУЩЕГО КОНТУРА И ЕГО ЧАСТЕЙ

В состав токоведущего контура аппарата входят части различные по конфигурации, конструкции и размерам. К ним относятся: зажимы контактных выводов, провода, кабели, шины, стержни, перемычки, контактодержатели, коммутирующие контакты и др.

Основной задачей расчета токоведущего контура является определение размеров сечения его частей. Результат расчетов позволит определять габаритные размеры магнитного пускателя. Исходной величиной для расчетов принято считать величину счения.

Расчет пускателя производим в режиме S1 – длительный режим.

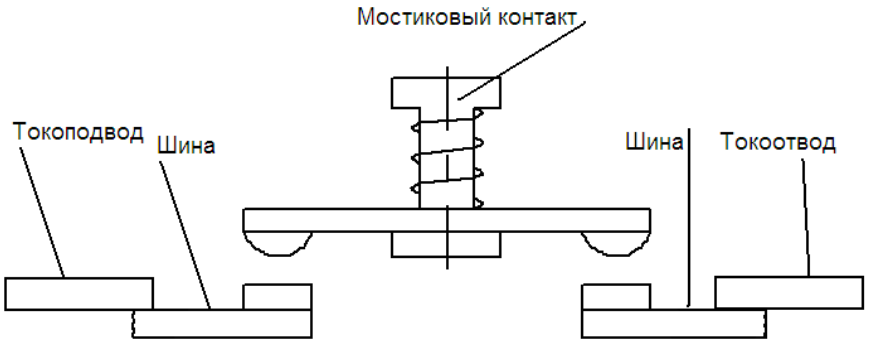


Рисунок 1 – Схема токоведущего контура

При отсутствии дополнительных требований по току короткого замыкания принимаем $I_{КЗ} = I_{Н} \cdot 10 = 40 \cdot 10 = 400 A$; $\mathrm{n} = \mathrm{a/b} = (6 \div 10) = 6$.

Проводник и окружающая его изоляция имеют разные допустимые температуры нагрева. Это обусловлено тем, что при высоких температурах диэлектрические свойства изоляции значительно ухудшаются. Поэтому согласно ГОСТ 8865-70 в соответствии со свойствами применяемой изоляции, используем в магнитном пускателе изоляционные детали (шина), соответствующие классу нагревостойкости В [1, с. 25], для которого допустимая температура проводника в продолжительном режиме $\mathrm{T_Д} = 105$ °С. Принимаем запас $\Delta \mathrm{T} = 5$ °С.

$$T = T_{Д} - \Delta T = 105 - 5 = 100^{0} C, \quad (1)$$

Таким образом превышение температуры $\tau = T - T_{окр} = 100 - 40 = 60^{0} C$. (2)

1.1 Определение размеров сечения шины

Определение размеров сечения шины будем производить по термической стойкости и по номинальному току (см. рисунок 2).

Термическая устойчивость аппарата – его свойство выдерживать кратковременные тепловые действия тока короткого замыкания. Это свойство характеризуется номинальным током термической устойчивости, т.е. величиной тока неизменной силы, тепловое действие которой аппарат может выдержать в течение заданного времени так, что это не повлияет на его дальнейшую работу.

Как правило время воздействия токов короткого замыкания значительно меньше постоянной времени нагрева токоведущих частей. Поэтому процесс нагрева происходит так, что тепло не отдаётся в окружающую среду. Т.е. процесс является адиабатическим.

1.1.1 Расчёт сечения шины по термической стойкости.

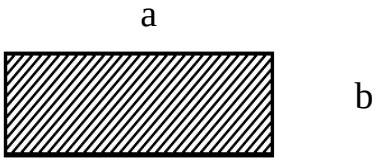


Рисунок 2 – Эскиз сечения шины

Определяем размеры сечения шины для времени короткого замыкания, установленного рекомендациями МЭК (1,3,5,10 секунд). Расчет производим на время короткого замыкания $t_{КЗ} = 3$ с. Принимаем материал шины – латунь марки Л63Т [9].

Допустимая температура нагрева токоведущих частей в режиме короткого замыкания неизолированных токоведущих частей аппарата выполненных из латуни согласно [1, с. 31, табл. 1-4] $T_К = 300$ °С.

Определяем площадь сечения шины [2, с. 415, формула 17-9]

$$S_T = I_{КЗ}\sqrt{\frac{t_{кз}}{A_К - A_Н}} = 400 \cdot \sqrt{\frac{3}{(3,75-1,5)\cdot 10^4}} = 5,023 \text{ мм}^2, \quad (3)$$

где $A_К$ и $A_Н$ определяем из кривых нагрева проводников при кратковременном протекании тока: для латуни [2, с. 415, рис. 17-2]

$$A_К = 3,75 \cdot 10^4 \frac{А^2 \cdot с}{мм^4} \text{ при } Т_К = 300\,°С, \quad (4)$$

$$A_Н = 1,5 \cdot 10^4 \frac{А^2 \cdot с}{мм^4} \text{ при } Т = 100\,°С. \quad (5)$$

С учетом того, что $S = a \cdot b$ и $n = \frac{a}{b} = 6$, получим

$a_T = \sqrt{n \cdot S_T} = \sqrt{6 \cdot 5,023} = 5,49$ мм – расчет ширины шины по термической стойкости, (6)

$b_T = \sqrt{S_T / n} = \sqrt{5,023 / 6} = 0,915$ мм – расчет толщины шины по термической стойкости. (7)

Полученное значение $b_Т$ округляем до стандартного ближайшего значения из ряда стандартных размеров завода «Уралпрокат» [10].

Принимаем $b_Т$=0,9 мм.

Уточняем значение $a_T = \frac{S_T}{b_T} = \frac{5,023}{0,9} = 5,581$ мм. (8)

Уточняем значение площади сечения шины:

$S_T = a_T \cdot b_T = 5,58 \cdot 0,9 = 5,022 мм^2$. (9)

1.1.2 Расчёт сечения шины по номинальному току.

Производим расчет сечения проводника по номинальному току.

В электрических аппаратах тепловые процессы протекают в пределах ограниченных температур, это значит, что сложные процессы одновременного действия трех видов теплообмена (конвекция, излучение и теплопроводность) можно рассматривать как отдельные действия каждого вида, а затем складывать параметры, полученные в результате отдельных расчетов. При этом учитываем действие только двух видов (конвекция и излучение), так как влияние теплопроводности незначительно.

Определяем значение средней температуры:

$$T_{ср} = T_{окр} + \frac{T}{2} = 40 + \frac{60}{2} = 70^0 C. \quad (10)$$

Коэффициент теплоотдачи конвекцией

$$K_{ТОК} = (1,39 - \frac{T_{ср}}{700})\left(\frac{\tau}{a_T}\right)^{0,25} = \left(1,39 - \frac{70}{700}\right)\cdot\left(\frac{60}{0,00558}\right)^{0,25} = 13,13 \ \frac{Вт}{м^2 \cdot град}. \quad (11)$$

Коэффициент теплоотдачи излучением

$$K_{ТОи} = 0,227 \cdot \zeta \cdot \left(\frac{T_{ср} + 273}{100}\right)^3 = 0,227 \cdot 0,3\left(\frac{70 + 273}{100}\right)^3 = 2,748 \ \frac{Вт}{м^2 \cdot град}, \quad (12)$$

где ζ – степень черноты, для меди [3, с. 590, табл. П5] $\zeta = 0,3$.

Определяем суммарный коэффициент теплоотдачи

$$K'_{ТО} = K_{ТОК} + K_{ТОИ} = 16,487 + 2,748 = 19,235 \ \frac{Вт}{м^2 \cdot град}.. \quad (13)$$

Так как шина находится не в воздухе, а окружена другими частями аппарата, коэффициент теплоотдачи уменьшается на 20-50 %. Принимаем коэффициент ухудшения $К_У$=1,5.

$$K_{ТО} = \frac{K'_{ТО}}{K_У} = \frac{19,235}{1,5} = 12,823 \ \frac{Вт}{м^2 \cdot град}.. \quad (14)$$

Определяем удельное сопротивление меди при температуре Т [2, с. 382, формула 15-3]

$$\rho = \rho_{20}\left(1 + \alpha\left(T - 20\right)\right) = 0,0184 \cdot 10^{-6} \cdot \left(1 + 0,0043\left(100 - 20\right)\right) = 2,473 \cdot 10^{-8} \ Ом \cdot м, \quad (15)$$

где ρ_{20} – удельное сопротивление медного проводника при 20 °С, [2, с. 382, табл. 15-3] $\rho_{20} = 0,01840 мкОм \cdot м$;

α – температурный коэффициент сопротивления [2, с. 383], в расчетах для меди принимают $\alpha = 0,0043\frac{1}{^0C}$.

Определяем значение геометрического показателя

$$Г = \frac{I_Н^2 \cdot \rho \cdot 10^9}{K_{ТО} \cdot \tau} = \frac{40^2 \cdot 2,473 \cdot 10^{-8} \cdot 10^9}{12,823 \cdot 60} = 60,821 \ мм^2. \quad (16)$$

$$b = \sqrt[3]{\frac{Г}{2 \cdot n\left(n+1\right)}} = \sqrt[3]{\frac{60,821}{2 \cdot 6 \cdot (6+1)}} = 0,94 \ мм.. \quad (17)$$

Округляем b по стандартному ряду значений b = 0,9 мм (завод «Уралпрокат» [10]).

$$a = \sqrt{\frac{\Gamma}{2b} + \frac{b^2}{4}} - \frac{b}{2} = \sqrt{\frac{60,821}{2 \cdot 0,9} + \frac{0,9^2}{4}} - \frac{0,9}{2} = 10,88 \text{ мм.} \approx 11 \text{ мм.} \quad (18)$$

Так как размер а изменился, уточним его:

Коэффициент теплоотдачи конвекцией

$$K_{TOK} = (1,39 - \frac{T_{cp}}{700})\left(\frac{\tau}{a_T}\right)^{0,25} = \left(1,39 - \frac{70}{700}\right) \cdot \left(\frac{60}{0,011}\right)^{0,25} = 11,08 \ \frac{Вт}{м^2 \cdot град}.. \quad (19)$$

Коэффициент теплоотдачи излучением не изменится.

Определяем суммарный коэффициент теплоотдачи

$$K'_{TO} = K_{TOK} + K_{TOИ} = 11,08 + 2,748 = 13,828 \ \frac{Вт}{м^2 \cdot град}.. \quad (20)$$

Так как шина находится не в воздухе, а окружена другими частями аппарата, коэффициент теплоотдачи уменьшается на 20-50 %. Принимаем коэффициент ухудшения $К_У$=1,5.

$$K_{TO} = \frac{K'_{TO}}{K_y} = \frac{13,828}{1,5} = 9,21 \ \frac{Вт}{м^2 \cdot град}.. \quad (21)$$

Удельное сопротивление меди не изменится.

Определяем значение геометрического показателя

$$\Gamma = \frac{I_H^2 \cdot \rho \cdot 10^9}{K_{TO} \cdot \tau} = \frac{40^2 \cdot 2,473 \cdot 10^{-8} \cdot 10^9}{9,21 \cdot 60} = 71,6 мм^2. \quad (22)$$

$$b = \sqrt[3]{\frac{\Gamma}{2 \cdot n(n+1)}} = \sqrt[3]{\frac{71,6}{2 \cdot 6 \cdot (6+1)}} = 0,98 мм.. \quad (23)$$

Округляем b по стандартному ряду значений b = 1 мм (завод «Уралпрокат» [10]).

Так как размер а изменился, уточним его.

$$a = \sqrt{\frac{\Gamma}{2b} + \frac{b^2}{4}} - \frac{b}{2} = \sqrt{\frac{71,6}{2 \cdot 1} + \frac{1^2}{4}} - \frac{1}{2} = 5,76 \text{ мм}. \quad (24)$$

Коэффициент теплоотдачи конвекцией:

$$K_{TOK} = (1,39 - \frac{T_{cp}}{700})\left(\frac{\tau}{a_T}\right)^{0,25} = \left(1,39 - \frac{70}{700}\right) \cdot \left(\frac{60}{0,00576}\right)^{0,25} = 13,43 \ \frac{Вт}{м^2 \cdot град}. \quad (25)$$

Коэффициент теплоотдачи излучением не изменится.

Определяем суммарный коэффициент теплоотдачи

$$K'_{TO} = K_{TOK} + K_{TOИ} = 13,43 + 2,748 = 16,178 \ \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot град}. \quad (26)$$

Так как шина находится не в воздухе, а окружена другими частями аппарата, коэффициент теплоотдачи уменьшается на 20-50 %. Принимаем коэффициент ухудшения $K_У$=1,5.

$$K_{TO} = \frac{K'_{TO}}{K_У} = \frac{16,178}{1,5} = 10,785 \ \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot град}.. \quad (27)$$

Удельное сопротивление меди не изменится.

Определяем значение геометрического показателя

$$Г = \frac{I_Н^2 \cdot \rho \cdot 10^9}{K_{TO} \cdot \tau} = \frac{40^2 \cdot 2,473 \cdot 10^{-8} \cdot 10^9}{10,785 \cdot 60} = 61,15 мм^2. \quad (28)$$

$$b = \sqrt[3]{\frac{Г}{2 \cdot n(n+1)}} = \sqrt[3]{\frac{61,15}{2 \cdot 6 \cdot (6+1)}} = 0,96 мм.. \quad (29)$$

Округляем b по стандартному ряду значений b = 1 мм (завод «Уралпрокат» [10]).

$$a = \sqrt{\frac{Г}{2b} + \frac{b^2}{4}} - \frac{b}{2} = \sqrt{\frac{61,15}{2 \cdot 1} + \frac{1^2}{4}} - \frac{1}{2} = 5,64 \text{ мм.} \approx 6 мм.. \quad (30)$$

Погрешность расчета менее 5%. Принимаем а = 6 мм.

Определяем фактическую площадь шины $S_Н = ab = 6 \cdot 1 = 6 мм^2$.

Выбираем размеры шины, рассчитанные по номинальному току ($S_Н$), так как данные размеры удовлетворяют и расчету по термической стойкости.

1.1.3 Поверка

Определяем превышение температуры и термическую стойкость.

Превышение температуры поверхности шины над температурой окружающей среды определяется по формуле.

$$P_{20} = \frac{I_Н^2 \cdot \rho_{20}}{S_Т} = \frac{40^2 \cdot 1,84 \cdot 10^{-8}}{5,4 \cdot 10^{-6}} = 5,45 \text{ Вт/м}. \quad (31)$$

$$П = 2 \cdot (a + b) = 2 \cdot (6+1) 10^{-3} = 0,014 м.. \quad (32)$$

$$\tau = \frac{P_{20}(1+\alpha_{20}(T_0-20))}{K_{TO}П-\alpha_{20}P_{20}} = \frac{5,45\left(1+0,0043\left(40-20\right)\right)}{9,308\cdot 0,014-0,0043\cdot 5,45} = 55,3^0 C. \quad (33)$$

Так как шина выбрана по номинальному току, перегрев является незначительным.

Определяем ток короткого замыкания для выбранного сечения для времени короткого замыкания $t_{КЗ} = 1$ с

$$I_{TC} = \sqrt{\frac{\gamma\cdot c\cdot S^2{}_T\cdot\left(10^{-6}\right)^2\ln(\frac{1+\alpha T_{K3}}{1+\alpha T_H})}{\rho\cdot\alpha\cdot t_{K3}}} = \sqrt{\frac{8900\cdot 390\cdot 5,022^2\cdot\left(10^{-6}\right)^2\ln\left(\frac{1+0,0043\cdot 300}{1+0,0043\cdot 100}\right)}{2,473\cdot 10^{-8}\cdot 0,0043\cdot 1}} =$$

= 583,5 А, (34)

где γ – плотность, для меди [1, с. 30, табл. 1-3] $\gamma = 8900\ \frac{кг}{м^3}$;

с – удельная теплоемкость, для меди [1, с. 30, табл. 1-3] $c = 390\ \frac{Дж}{кг\cdot{}^0 C}$.

$$I_{TC} = \sqrt{\frac{\gamma\cdot c\cdot S^2{}_T\cdot\left(10^{-6}\right)^2\ln(\frac{1+\alpha T_{K3}}{1+\alpha T_H})}{\rho\cdot\alpha\cdot t_{K3}}} = \sqrt{\frac{8900\cdot 390\cdot 5,022^2\cdot\left(10^{-6}\right)^2\ln\left(\frac{1+0,0043\cdot 300}{1+0,0043\cdot 100}\right)}{2,473\cdot 10^{-8}\cdot 0,0043\cdot 3}} =$$

= 517,7 А, при $t_{КЗ} = 3$ с, (35)

$$I_{TC} = \sqrt{\frac{\gamma\cdot c\cdot S^2{}_T\cdot\left(10^{-6}\right)^2\ln(\frac{1+\alpha T_{K3}}{1+\alpha T_H})}{\rho\cdot\alpha\cdot t_{K3}}} = \sqrt{\frac{8900\cdot 390\cdot 5,022^2\cdot\left(10^{-6}\right)^2\ln\left(\frac{1+0,0043\cdot 300}{1+0,0043\cdot 100}\right)}{2,473\cdot 10^{-8}\cdot 0,0043\cdot 5}} =$$

= 459,3 А, при $t_{КЗ} = 5$ с, (36)

$$I_{TC} = \sqrt{\frac{\gamma\cdot c\cdot S^2{}_T\cdot\left(10^{-6}\right)^2\ln(\frac{1+\alpha T_{K3}}{1+\alpha T_H})}{\rho\cdot\alpha\cdot t_{K3}}} = \sqrt{\frac{8900\cdot 390\cdot 5,022^2\cdot\left(10^{-6}\right)^2\ln\left(\frac{1+0,0043\cdot 300}{1+0,0043\cdot 100}\right)}{2,473\cdot 10^{-8}\cdot 0,0043\cdot 10}} =$$

= 405,4 А, при $t_{КЗ} = 10$ с, (37)

Результаты расчета токоведущей шины при заданном номинальном токе показали, что, проектируемый магнитный пускатель, рассчитан на протекание тока короткого замыкания в течение $t_{КЗ} = 10$ с. Что говорит о его способности выдерживать тяжелые условия работы.

1.2 Проектирование контактного соединения

В пускателе применяем неразмыкаемые в процессе работы контактные соединения. Это зажимы для присоединения внешних проводов и соединения токоведущих частей внутри аппарата. Применяем свинченные соединения.

Так как мы используем контактные зажимы, то определим болт лишь для зажимов.

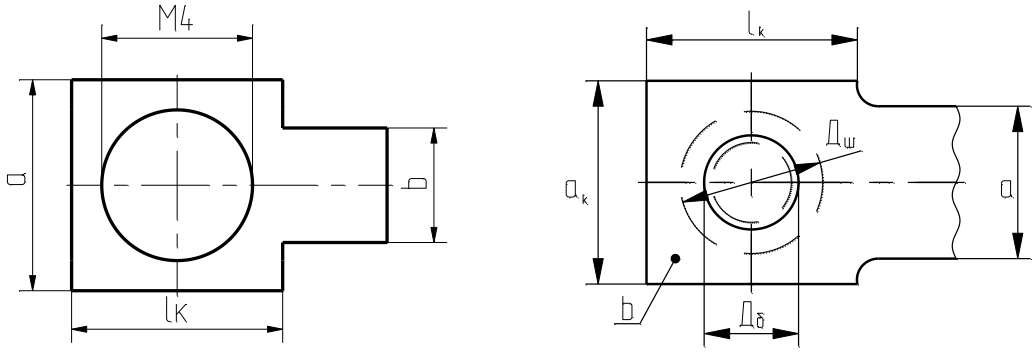


Рисунок 3 – Эскиз болтового соединения

По значению номинального тока выбираем размер болта М4. Материал болта сталь 3. В качестве защитного покрытия применим лужение (припой оловянный).

Расчетная сила, развиваемая данным болтом $F_{б} = 160$ кгс. [2, с. 469, табл. 22-3]

Чтобы обеспечить механическую прочность установки болта необходимо, чтобы площадка под болт, согласно [2, стр. 469, табл. 22-3], имела размеры не меньше $a_к = l_к = 8$ мм, где $l_к$ – длина площадки шины, на которой будет установлен болт.

Определяем усилие болта

$$P_0 = \frac{F_\delta}{S} = \frac{160}{0,64} = 250 \text{ кгс/см}^2. \quad (38)$$

Проверяем условие $P_0 > 100$ кгс/см^2 (250 > 100). Условие выполнено.

Рассчитываем переходное сопротивление контактного соединения согласно [2, стр. 470, формула 22-6]

$$R_{ПХ} = \frac{K_{ПХ}}{n(F_\delta)^m} \cdot \left(1 + \frac{2}{3} \cdot \alpha(T_Д - T_{ОКР})\right) = \frac{0,07 \cdot 10^{-3}}{1(100)^{0,7}} \cdot \left(1 + \frac{2}{3} 0,0043(105 - 40)\right) = 3,306 \cdot 10^{-6} \text{Ом},$$

(39)

где $К_{ПХ}$ – коэффициент, характеризующий свойства материала и состояние контактной поверхности, для соединения контакта медь – медь (луженые поверхности) $К_{ПХ} = (0,07 \div 0,1) \cdot 10^{-3}$ $Ом/кгс^m$ [2, стр. 99];

m – коэффициент, учитывающий форму контактирующих частей проводников, для шинного соединения m=0,7;

n – число болтов в соединении.

Сопротивление контакт-детали

$$R_{КХ} = K_Ш \cdot \rho \cdot \frac{l_K}{a_K b_T} = 0,601 \cdot 2,473 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{8 \cdot 10^{-3}}{8 \cdot 10^{-3} \cdot 1 \cdot 10^{-3}} = 1,652 \cdot 10^{-5} Ом,$$

(40)

где $K_Ш = 0,5 + 0,9 \frac{b_T}{a_K} = 0,5 + 0,9 \frac{1}{8} = 0,601$.

(41)

Полное сопротивление контактного соединения равно

$$R_К = R_{ПХ} + R_{КХ} = 3,306 \cdot 10^{-6} + 1,652 \cdot 10^{-5} = 1,983 \cdot 10^{-5} Ом.$$

(42)

Проверяем условие $R_К \le R_{ПР}$. $1,983 \cdot 10^{-5} \le 3,53 \cdot 10^{-5}$ - условие выполняется.

Рассчитываем падение напряжения контактного соединения при протекании через него номинального тока

$$U_К = R_К I_К = 1,983 \cdot 10^{-5} \cdot 44 = 0,8625 \text{ мВ}.$$

(43)

Падение напряжения на контактах не должно превышать 5÷10 мВ. Данное условие выполняется.

Определяем превышение температуры контактной площадки над температурой проводника

$\Delta\Theta_{KX} = \frac{U_K{}^2}{8\lambda\rho} = \frac{(0,8625\cdot10^{-3})^2}{8\cdot390\cdot2,473\cdot10^{-8}} = 0,009641$ ^{0}C, полученное значение меньше (4-10) ^{0}C, что является верным критерием расчета.

2 РАСЧЕТ КОММУТИРУЮЩЕГО КОНТАКТА

Форма контактов определяется множеством факторов. Главные контакты должны иметь как можно меньшее электрическое сопротивление. Двукратный разрыв или мостиковый контакт целесообразно применять при номинальных напряжениях 220-380 В переменного тока и токах от единиц ампер индуктивной нагрузки. К преимуществам такого типа контактного соединения относятся: значительно большая по сравнению с однократным коммутационная способность и отсутствие быстро изнашивающегося гибкого соединения. Недостатком применения такого контакта является необходимость удвоения усилия контактного нажатия, а, следовательно, и необходимость увеличения приводного механизма аппарата. Форма контактной поверхности зависит также от величины тока. Для аппаратов со значением номинального тока до нескольких десятков ампер наиболее частым является применение точечного контакта сфера-плоскость. Такая форма даже одного из контактов позволяет очистить от пыли место конактирования. Малые силы нажатия вызывают необходимость применения неокисляющихся дорогостоящих металлов.

Выбираем плоскую форму площадки контактов для подвижного и сферическую для неподвижных контактов (рисунок 4). Фактически контакт сфера-плоскость.

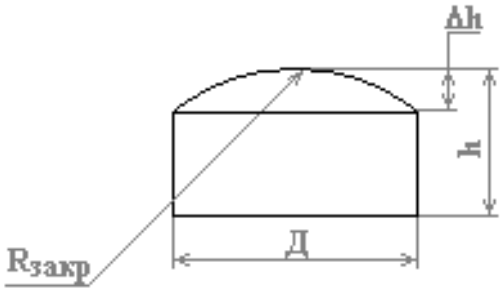


Рисунок 4 – контактная накладка круглой формы.

Размеры контактов выбираем по величине тока. При токе (20÷40) А, диаметр контакта находится в пределах Д=(4÷12) мм, высота $h_К$ =(1,2÷2,2) мм. Принимаем значение диаметра Д=4 мм и высоты контакта $h_К$ =1,3 мм. Теоретическое количество точек соприкосновения контактов n=1.

К свойствам материала коммутирующего контакта предъявляют следующие требования: низкое удельное и контактное переходные сопротивление, высокие теплопроводность, теплоемкость и температура плавления, высокая коррозийная стойкость и стойкость против сваривания, высокая твердость, которая обуславливает механическую износостойкость, материал должен обладать хорошими технологическими свойствами и невысокой стоимостью.

Выбор конструктивных форм контактной системы аппарата определяется многими факторами. Так как имеется малое значение тока (от единиц до нескольких десятков ампер) целесообразно применять двукратный разрыв, т.е. мостиковый коммутирующий контакт.

Мостиковые контакты образуются из подвижной контакт-детали – мостика 1 (рисунок 3 а, б) и неподвижных контакт-деталей 3 и 4, к которым пайкой или сваркой прикреплены рабочие поверхности 2. Ток проходит от неподвижной контакт-детали 3 через подвижный мостик 1 к другой неподвижной контакт-детали 4. При разомкнутых контакт-деталях создается двойной разрыв между ними, что является преимуществом по сравнению с контактами других типов. Другое преимущество – отсутствие гибких связей между подвижными и неподвижными токоведущими частями.

У мостиковых контактов нет возможности самоочищения, так как отсутствуют перекатывание и проскальзывание контакт-деталей. Поэтому рабочие поверхности контакт-деталей изготовляют не из меди, а из серебра или металлокерамики на базе серебра и выполняют в виде плоскость – плоскость, плоскость – цилиндр, плоскость – сфера и сфера – сфера.

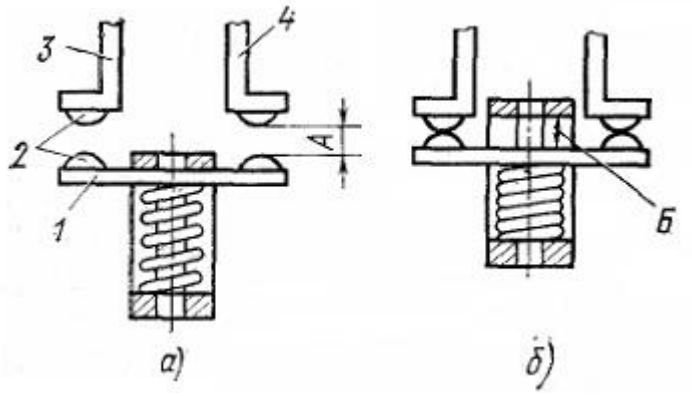


Рисунок 5 – Мостиковый коммутирующий контакт

В качестве материала контакта выбираем серебро, окись кадмия с мелкодисперсной структурой (85%Ag-15%CdO), имеет следующее обозначение КМК А10м. Этот материал удовлетворяет большинству требований, предъявляемых к контактам, имеет высокую дугостойкость, высокую стойкость против сваривания и высокую износостойкость.

Основные свойства материала [2, с. 86, табл. 5-3]:

Плотность: $\gamma = 9{,}7\ \text{г/см}^3$,

Удельное электрическое сопротивление: $\rho_{20} = 1{,}84 \cdot 10^{-8}\ \text{Ом} \cdot м$,

Теплопроводность: $\lambda = 325\ \text{Вт/(м} \cdot \text{град)}$,

Твердость по Бринеллю: $H_B = (8{,}0 \div 10{,}5) \cdot 10^8$ Па,

Температурный коэффициент сопротивления: α=0,0043 1/град,

Модуль упругости: $E = 13 \cdot 10^{10}$ Па.

Геометрические размеры коммутирующих контактов главным образом зависят от величины номинального тока.

Форму площадки подвижного контакта принимаем сферической.

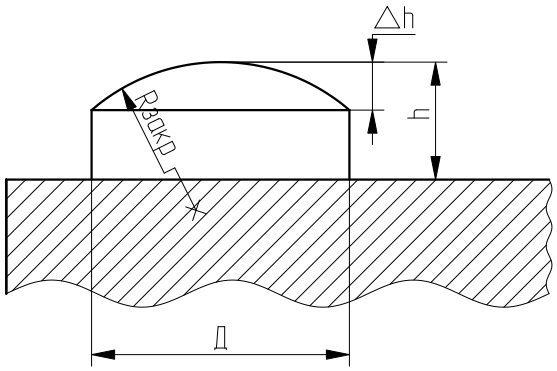


Рисунок 6 – Контактная накладка сферической формы

Размеры цилиндрических контактных накладок принимаем по величине номинального тока. Согласно [2, с. 94, табл. 5-5] принимаем значение диаметра Д = 4 мм и высоту контакта h = 1,4 мм. Принимаем теоретическое количество точек соприкосновения контактов n = 1.

Определяем радиус закругления контактов

$$R_{закр} = \frac{(Д/2)^2 + \Delta h^2}{2 \cdot \Delta h} = \frac{(4/2)^2 + 0,4^2}{2 \cdot 0,4} = 5,2 \text{ мм}. \quad (44)$$

Согласно ГОСТ 403-73 [1, с. 37] для контактов с накладками из металлокерамических композиций на базе серебра с окисью кадмия допустимая температура $T_Д = 200^0 C$. Данная температура ограничивается максимально допустимыми температурами смежных частей. Принимаем $T_{доп} = 120^0 C$, так как контакты расположены близко друг к другу.

При протекании тока через замкнутые контакты и вследствие воздействия дуги при коммутациях тока контакты нагреваются, а переходное сопротивление увеличивается из-за роста удельного сопротивления материла контактов. Определяем удельное сопротивление [2, с.103, формула 5-15] .

$$\rho = \rho_{20}(1 + \frac{2}{3} \cdot \alpha(T_{доп} - 20)) = 1,84 \cdot 10^{-8}(1 + \frac{2}{3} \cdot 0,0043(120 - 20)) = 2,37 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot м \quad (45)$$

Сила контактного нажатия должна быть достаточна как в рабочем режиме, так и при кратковременных сверхтоках – пусковых, перегрузочных и короткого замыкания, чтобы не было отбросов контактов вследствие электродинамических сил и не было их сваривания вследствие дугообразования при отбросах и вибрации.

Определяем конечное контактное нажатие согласно [2, с. 105, формула 5-16]

$$F_K = f_K \cdot I_H = (7 \div 15) \cdot I_H = 42 \div 90 \text{ гс} = 0,412 \div 0,882 \text{ Н}, \quad (46)$$

где f_K – удельное нажатие, для электромагнитных пускателей с накладками из металлокерамики, составляет f_K = (7÷15) гс/А [2, с. 104, табл. 5-7].

Принимаем окончательное значение F_K=0,8 Н.

Согласно рекомендациям, представленным в [2, с. 106] величина начального нажатия контактов принимается равной 0,4-0,75 от величины конечного нажатия.

Принимаем F_{KH}= 0,75F_K=0,75(0,412÷0,882)=(0,309÷0,662) Н =0,6 Н. (47)

При силе контактного нажатия 0,1÷0,15 Н до сотен ньютонов имеет место упругая деформация слоя металла [2, с. 98]. При данном виде деформации материала радиус контактной площадки определяется по следующей зависимости [2, с. 99, формула 5-10]

$$a = 1,11 \cdot \sqrt[3]{\frac{F_K \cdot R_{закр}}{E \cdot n}} = 1,11 \cdot \sqrt[3]{\frac{0,8 \cdot 0,0052}{13 \cdot 10^{10} \cdot 1}} = 3,665 \cdot 10^{-5} \text{ м}. \quad (48)$$

Для проверки вида деформации определяем механическое напряжение для конечного нажатия

$$P = \frac{F_K}{\pi \cdot a^2} = \frac{0,8}{3,14 \cdot (3,665 \cdot 10^{-5})^2} = 2,134 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^2. \quad (49)$$

$$G_C = \frac{4 \cdot F_K}{\pi \cdot a^2} = \frac{4 \cdot 0,8}{3,14 \cdot (3,665 \cdot 10^{-5})^2} = 8,535 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^2. \quad (50)$$

$P < P_{CM}$ – упругая деформация, значит радиус контактной площадки найден верно.

Определим переходное сопротивление коммутирующих контактов.

Переходное сопротивление коммутирующих контактов, определяется по теоретическим зависимостям. Зависимость переходного сопротивления стягивания (сужения) имеет вид [2, с. 98, формула 98]

$$R_{CT} = \frac{\rho}{2 \cdot a \cdot n} = \frac{2,367 \cdot 10^{-8}}{2 \cdot 3,665 \cdot 10^{-5} \cdot 1} = 3,23 \cdot 10^{-4} \text{ Ом}. \quad (51)$$

Переходное сопротивление коммутируемых контактов, определяемое по формуле, основывающейся на опытных данных [1, с. 38, формула 1.56]

$$R_{ПР} = \frac{k_{ПХ}}{(0{,}1 \cdot F_K)^m}\left(1 + \frac{2}{3} \cdot \alpha \cdot (T_{доп} - 20)\right) = \\ = \frac{(0{,}2 \div 0{,}3) \cdot 10^{-3}}{(0{,}1 \cdot 0{,}8)^{0{,}5}}\left(1 + \frac{2}{3} \cdot 0{,}0043(120 - 20)\right) = (8{,}578 \div 12{,}87) \cdot 10^{-4}\, Ом, \quad (52)$$

где $k_{ПХ}$ – коэффициент, учитывающий материал и состояние контактных поверхностей, для металлокерамики [2, с. 99] $k_{ПХ}=(0{,}2 \div 0{,}3)10^{-3}$;

m – коэффициент формы контактной поверхности, для точечного контакта [2, с. 99] m=0,5.

Принимаем значение переходного сопротивления $R_{ПР} = 12{,}87 \cdot 10^{-4}$ Ом.

Рассчитываем напряжение на контакте.

Падение напряжения на замкнутых коммутирующих контактах в токоведущем контуре аппарата складывается, в основном, из переходного сопротивления коммутирующих контактов. Определяем падение напряжения согласно [2, с. 106, формула 5-17]

$$U_K = I_K \cdot R_{ПР} = 40 \cdot 12{,}87 \cdot 10^{-4} = 51{,}48 \cdot 10^{-3} \text{ В}. \quad (53)$$

В аппаратах управления низкого напряжения, при контактах в воздухе рассчитанное падение напряжение должно находиться в следующих пределах до 2–50 мВ [2, с. 108]. Данное условие в расчете выполняется.

2.1 Тепловой расчет

Рассчитываем температуру коммутирующего контакта [2, с. 95, формула
5-1]

$$T_{КК} = \Delta T_{КХ} + T_Р + T_Ш + T_{ОКР.СР} \quad (54)$$

Величина падения напряжения в контакте связана с превышением температуры контактной площадки над температурой контакта зависимостью [2, с. 106, формула 5-18]

Определяем превышение температуры контактной площадки над температурой контакта

$$\Delta T_{KX} = \frac{U_K^{\,2}}{8 \cdot \lambda \cdot \rho} = \frac{(55,98 \cdot 10^{-3})^2}{8 \cdot 325 \cdot 2,367 \cdot 10^{-8}} = 50,9^0 C\,. \quad (55)$$

Превышение температуры в пределах находится в пределах допустимых значений (5-10) °С.

$$T_P = \frac{P_K}{2\sqrt{\lambda \cdot S \cdot \Pi \cdot K_{TO}}} = \frac{2,435}{2\sqrt{325 \cdot 5,4 \cdot 10^{-6} \cdot 0,014 \cdot 19,235}} = 56,012\ ^0\text{C},$$

(56)

Коммутируемая мощность:

$$P_K = I_H^{\,2} R_{\Pi P} = 40^2 \cdot 12,87 \cdot 10^{-4} = 2,435 Bm\,. \quad (57)$$

Коэффициент теплоотдачи:

$$\begin{aligned} \mathrm{K_{TO}} &= 0,92 \times 10^{-3} \times \left(1 + 1 \times 10^4 \left(\mathrm{Q} - \mathrm{Q_{oc}}\right)\right) = \\ &= 0,92 \times 10^{-3} \times \left(1 + 1 \times 10^2 \left(120 - 40\right)\right) = 9,1\ \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \times \text{град}}. \end{aligned} \quad (58)$$

Таким образом температура коммутирующего контакта равна

$$T_K = \Delta T_{KX} + T_P + \tau + T_{OKP.CP} = 50,9 + 56,012 + 46,128 + 40 = 193,059\ ^{\circ}\text{C}. \quad (59)$$

Так как шина выбрана по номинальной стойкости ее температура незначительно меньше допустимой. Поэтому температура коммутирующего контакта тоже незначительно меньше принятого допустимого значения.

При протекании значительно больших номинальных токов через коммутирующие контакты, происходит повышенное нагревание и как результат их сваривание. Если отключаемый механизм способен разомкнуть сварившиеся контакты, то сваривание контактов может и не привести к выходу аппарата из строя.

Критериями оценки являются два параметра, это начальный ток сваривания контактов и сила, необхоимая для отрыва сварившихся контактов.

Определяем ток сваривания контактов.

Определяем ток сваривания методом, устанавливающим зависимость между падением напряжения в контактах и установившейся температурой контактной напайки:

$$I_{CB} = A \cdot \sqrt{f_{K.\Pi\Pi}} \cdot \sqrt{F}_K = 307,409 \cdot \sqrt{2,5} \cdot \sqrt{0,9} = 461,113 A\,, \quad (60)$$

где $f_{К.ПЛ}$ – коэффициент, характеризующий увеличение контактной площадки в процессе нагревания, зависит от силы нажатия и от продолжительности импульса находится в пределах 2÷4 [2, с. 112]. Принимаем $f_{К.ПЛ}$ = 3,5;

А – постоянная для каждого материала величина,

$$A = \sqrt{\frac{32 \cdot \lambda \cdot T_{ПЛ} \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \alpha \cdot T_{ПЛ}\right)}{\pi \cdot H_{В} \cdot \rho \cdot \left(1 + \frac{2}{3} \cdot \alpha \cdot T_{ПЛ}\right)}} = \sqrt{\frac{32 \cdot 325 \cdot 960 \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot 0,0043 \cdot 960\right)}{3,14 \cdot 10,5 \cdot 10^{8} \cdot 2,367 \cdot 10^{-8} \cdot \left(1 + \frac{2}{3} \cdot 0,0043 \cdot 960\right)}} = 307,4, \quad (61)$$

где $T_{ПЛ}$ – температура плавления материала контакта. Для контактов на основе серебра $T_{ПЛ}$ = 960 °С [2, с. 107, табл. 5-8].

Другой метод, приводящий к удовлетворительному совпадению расчетного значения с экспериментом, для маломощных одноточечных серебряных контактов дает зависимость представленная в [2, с. 112, формула 5-24]

$$I_{СВ} = \frac{2 \cdot U_{ПЛ} \cdot \sqrt{F_{К}}}{\rho \cdot \sqrt{\pi \cdot H_{В}}} = \frac{2 \cdot 0,37\sqrt{0,9}}{2,367 \cdot 10^{-8} \cdot \sqrt{3,14 \cdot 10,5 \cdot 10^{8}}} = 557,806A, \quad (62)$$

где $U_{ПЛ}$ – напряжение плавления металла контактов. Для контактов на основе КМК-А10м $U_{ПЛ}$ = 370 мВ.[2, с. 107, таблица 5-8]

Ожидаемые по расчетам токи сваривания превышают ток короткого замыкания, это означает, что контакты «проходят» расчет на термическую стойкость.

2.2 Динамическая стойкость

Проверим силу отброса контактов. Электродинамическая сила, вызывающая отталкивание контактов, возникает вследствие сужения линий тока в контакт – детали при подходе его к месту контактирования. Согласно [1, с. 40, формула 1-61]

$$F = 10^{-7} (I_{КЗ})^{2} \cdot \ln(Д / d) = 10^{-7} \cdot 435^{2} \cdot \ln\left(\frac{4 \cdot 10^{-3}}{1 \cdot 10^{-3}}\right) = 0,026. \quad (63)$$

Для надежной работы аппарата необходимо чтобы выполнялось условие, F не превышало (10-20)% от значения F_K

$$F = (10 \div 20)\% \cdot F_K = 0{,}23 \div 0{,}46 \text{ Н}. \quad (64)$$

Данное условие выполняется.

Контакты не будут самопроизвольно расходиться под действием электродинамических сил, так как принятая сила контактного нажатия больше силы электродинамического отталкивания в контактах, поэтому.

3 РАСЧЕТ ДУГОГАСИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

При размыкании электрических цепей с помощью контактов электрических аппаратов как правило на них возникает дуговой разряд, при условии, что величина тока и напряжения превосходит некоторые критические значения. Эти критические значения зависят от ряда факторов: материала контактов, параметров цепи, свойств среды и др.

Электрическая дуга может привести к очень серьезным последствиям. Например, после повреждения контактов подключенный электропривод может в следующий раз попросту не запуститься, а это уже нарушит весь технологический процесс предприятия, ведь это оборудование должно питать энергией какие-либо станки и т.п. Во время размыкания электрооборудования уменьшается контактная поверхность и из-за этого резко увеличивается переходное сопротивление, температура и плотность тока. В итоге из-за повышенной температуры электроны начинают двигаться с огромной скоростью, что заставляет их «вылетать» с поверхности контактных элементов.

Раствор контактов при гашении дуги переменного тока аппаратов низкого напряжения не имеет обычно такого решающего значения, как при постоянном токе. Однако при большом растворе и более длинной дуге без необходимости увеличивается выделяемая в ней энергия. Малые растворы контактов также применять нельзя, с целью предотвращения повторного включения контактов после отброса контактной системы от упора при

отключении, а также возможность образования при отключении тока между контактами перемычки из расплавленного металла.

При выборе значения раствора руководствуются опытными данными, полученными при однократном разрыве цепи тока при отсутствии магнитного гашения при свободной открытой дуге. Согласно выбранному прототипу принимаем раствор контактов 4 мм.

Основным способом гашения дуги переменного тока до (220 – 380) В, (50 – 500) Гц является двукратный разрыв цепи. Определяющими факторами являются начальная восстанавливающаяся прочность ($U^0_{ВП}$) околокатодной зоны и число разрывов цепи тока (n). Двукратный разрыв обеспечивается мостиковым контактом (рисунок 7).

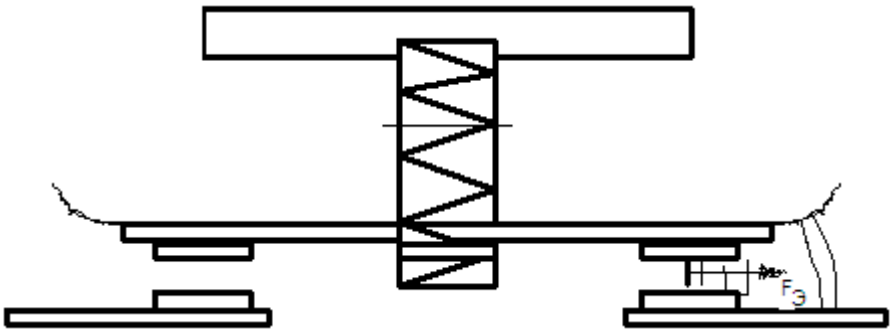


Рисунок 7 – Мостиковый контакт в разомкнутом состоянии (форма контактных напаек упрощена)

Переходный процесс восстановления напряжения может быть колебательным или апериодическим. При апериодическом процессе восстанавливающееся напряжение $U_В$ не может быть больше амплитудного значения $U_{ОТК}$ напряжения отключаемого источника питания. При колебательном процессе $U_В$ практически не превышает 2 $U_{ОТК}$.

Для пускателей по ГОСТ 11206-65 [2, с. 132] предельный отключаемый ток цепей переменного тока $I_{ПРД.ОТК.} = 10 \cdot I_Н = 10 \cdot 40 = 400$ А.

Величину начальной восстанавливающейся прочности принимаем $U^0_{В.П.} = 165$ В [1, с. 100, рис. 3-23].

По кривым, представленным в [1, с. 46, рис. 1-21] берем предельно возможную собственную частоту. По величине отключаемого тока

определяем собственную частоту отключаемой цепи, которая имеет значение $f_0 = 50$ кГц.

Скорость роста прочности определяем по [1, с. 100, рис. 3-23] по величине тока отключения $K_П$ = 90 В/мкс.

Для дугогасительных устройств со свободной дугой коэффициент амплитуды определяем по [1, с. 114, формула 3-32]

$$K_a = 1 + e^{-0,0003 \cdot f_0} = 1 + e^{-0.0003 \cdot 30000} \cong 1. \quad (65)$$

Определяем удельную величину эквивалентного сопротивления дуги [2, с. 170, формула 6-40]

$$R_Д^0 = 0,015 + \frac{14200}{I_{ОТК}^2} = 0,015 + \frac{14200}{435^2} = 0,09 \text{ Ом/см}. \quad (66)$$

Индуктивность отключаемой цепи определяем по [2, с. 167, формула 6-32]

$$L = \frac{U_Н}{I_{ОТ} \cdot \omega} \sqrt{1 - \cos^2 \phi} = \frac{220}{435 \cdot 314} \sqrt{1 - 0,87^2} = 0,794 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}. \quad (67)$$

Определяем длину дуги на один разрыв для токов (80÷100) А по [2, с. 170, формула 6-37]

$$l_Д{}^0 = \sqrt{\delta_К{}^2 + \frac{40,5 \cdot I_{ОТК}^2 \cdot t^2}{\delta_К}} = \sqrt{4^2 + \frac{40,5 \cdot 435^2 \cdot 0,008^2}{4}} = 4,035 \text{ мм}, \quad (68)$$

где t – время гашения дуги, принимают [1, с. 122] меньше одного полупериода тока t = 0,008 с, чтобы обеспечить гарантированное гашение дуги в момент первого перехода тока через нулевое значение.

Рассчитываем число разрывов при апериодическом процессе по [1, с. 117, формула 3-40]

$$n \geq \frac{K_Н U_Н - \left(\frac{\beta_К \cdot K_П \cdot L}{M_0} \right) \left(1 + \ln \frac{K_Н U_Н M_0}{\beta_К K_П \cdot L} \right)}{U_{ВП}^0 + 0,34 \cdot K_Н \cdot l_Д^0 \cdot R_Д^0 \cdot I_{ОТК}} = \quad (69)$$

$$= \frac{0,61 \cdot 380 - \left(\frac{6 \cdot 0,9 \cdot 0,794 \cdot 10^{-3}}{310 \cdot 10^{-6}} \right) \left(1 + \ln \frac{0,61 \cdot 380 \cdot 310 \cdot 10^{-6}}{6 \cdot 0,9 \cdot 0,794 \cdot 10^{-3}} \right)}{165 + 0,34 \cdot 0,61 \cdot 4,008 \cdot 0,09 \cdot 435} = 0,905 \approx 1,$$

где $k_Н$ – коэффициент, определяемый по [2, с. 171, формула 6-43]

$$k_H = 0.9 \cdot k_{CX}\sqrt{1-\cos\phi} = 0,9 \cdot 1,5\sqrt{1-0,8} = 0,61, \quad (70)$$

где k_{CX} – коэффициент схемы, который определяется схемой отключаемой цепи и отключающего аппарата. По [2, с. 164] для отключения трехфазной цепи трехполюсным аппаратом k_{CX} = 1,5;

M_0 – функция отключаемого тока, определяем по [1, с. 117, рис. 3-36а]. При $I_{ОТК.} = 336$ А, $M_0 = 310 \cdot 10^{-6}$ $В \cdot Гн / мкс \cdot В$;

β_K – коэффициент, учитывающий влияние контактного материала на скорость восстановления прочности. По [1, с. 116, табл. 3-4] для контактов из серебра при частоте источника питания 50 Гц, $\beta_K = 6$.

Полученное значение количества контактов является значительно меньшим, чем используется в магнитном пускателе, то есть дуга при n = 2 будет гаситься.

Проверяем по [1, с. 117, формула 3-41] условие перехода колебательного процесса восстановления напряжения в апериодический

$$f_0 = 30000 \geq M_0 \cdot n_a \cdot 10^6 / (\pi \cdot L) = 310 \cdot 10^{-6} \cdot 1 \cdot 10^6 / 3,14 \cdot 4,379 \cdot 10^{-3} = 5516 \text{ Гц}. \quad (71)$$

Условие выполняется. Таким образом в данном случае наблюдается апериодический процесс восстановления напряжения и два разрыва на полюс аппарата достаточно для гашения дуги в воздухе.

4 РАСЧЕТ МЕХАНИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Для расчета механической характеристики используем методику, изложенную в [2].

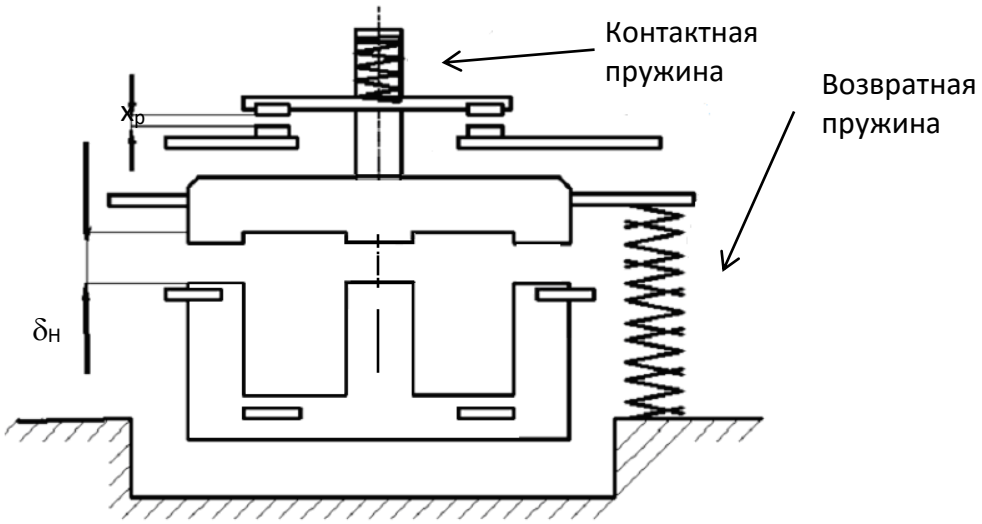


Рисунок 8 –Система прямоходового типа

Противодействующие усилия создаются двумя возвратными пружинами и контактными пружинами. В зависимости от установки пускателя на монтажной панели, на противоположные усилия может оказывать вес подвижных частей (якоря, траверсы и других деталей). Если пускатель устанавливается якорем верх, то вес подвижных частей будет действовать в ту же сторону, что и тяговые усилия. Если кпускатель устанавливается якорем вниз, то вес подвижных частей действует в противоположную сторону по отношению к тяговому усилию. В первом случае вес подвижных частей следует вычитать из суммарного противодействующего усилия. Во втором случае необходимо суммировать. В том случае, когда пускатель установлен на вертикальной динрейке (как в нашем случае) вес подвижных частей не оказывает влияния на противодействующие усилия.

4.1 Выбор вида пружины и ее материала

Практически каждый электрический аппарат имеет одну или несколько пружин. Так в нашем случае пускатель имеет одну контактную пружину и две возвратных. Значительное число пружин электрических аппаратов, выполняя ответственную роль, определяют основные характеристики аппаратов, поэтому их расчет имеет большое значение.

Из всех видов выпускаемых сегодня пружин наиболее часто применяются цилиндрические витые и пластинчатые холодноштампованные пружины.

Согласно выбранному прототипу принимаем витые цилиндрические пружины, работающие на сжатие, с прижатыми витками (рисунок 9).

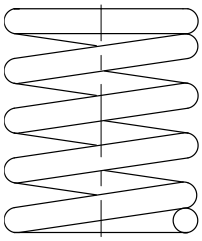


Рисунок 9 – Витая цилиндрическая пружина, работающая на сжатие с прижатыми (пассивными) витками

Расчет пружины производится на основании теории деформации винтовой пружины, навитой из проволоки или прутка круглого сечения и воспринимающей осевую сжимающую нагрузку.

Исходными величинами при расчете являются: сила контактного нажатия и необходимый прогиб.

Раствор и провал контакта примем с прототипа, тогда раствор контактов $x_Р$ = 4 мм, провал контактов $x_П$ = 4 мм.

Определим суммарный ход якоря:

$$\delta_Н = x_\Sigma = x_Р + x_П = 4 + 4 = 8 \text{ мм}. \quad (72)$$

Силы контактного нажатия

Из расчета коммутирующего контакта примем значения начального и конечного контактного нажатия:

$F_{КК}$ = 0,94 Н – сила конечного нажатия,

$F_{КН}$ = 0,7 Н – сила начального нажатия.

Определяем силу давления на упор:

$$F_У = f_У \cdot I_Н = 0{,}15 \cdot 40 = 6 \text{ Н}. \quad (73)$$

где $f_У$ – удельное давление на 1 А, для пускателя $f_У$ =(0,1÷0,15) Н/А, примем $f_У$ =0,15 Н/А.

Рассчитываем усилия контактов с учетом вида и числа контактов:

$$\Sigma F_{KH} = n \cdot N \cdot F_{KH} = 3 \cdot 2 \cdot 0,7 = 4,2, \quad (74)$$

$$\Sigma F_{KK} = n \cdot N \cdot F_{KK} = 3 \cdot 2 \cdot 0,933 = 4,6, \quad (75)$$

где n – число контактов главной цепи для проектируемого аппарата n=3,

N – поправка на вид контактов. Контактное нажатие необходимо учитывать на каждый контакт, так как используем мостиковый контакт N=2.

4.2 Расчет параметров возвратной пружины

Принимаем материал для пружины – сталь качественная рессорно-пружинная в прутках, ГОСТ 2052-53, круглая, горячей навивки, марка 65Г.

Основные свойства материала [2, с. 474, табл. 22-5]:

Прочность при растяжении $\sigma_{ПР.Р.} = 1000$ Н/мм^2;

Допустимый предел выносливости при изгибе $\sigma_{Д.И.} = 450$ Н/мм^2;

Допустимый предел выносливости при кручении $\sigma_{Д.КР.} = 350$ Н/мм^2;

Модуль упругости E=200000 Н/мм^2;

Модуль сдвига G=80000 Н/мм^2.

Рассчитываем начальную силу возвратной пружины в отпущенном состоянии

Рассчитываем начальную силу возвратной пружины в отпущенном состоянии

$$F'_{ВН} = F_У = 6,525. \quad (76)$$

С учетом того, что в конструкции прототипа применяется две возвратные пружины, начальную силу пружины уменьшаем в два раза

$$F_{ВН} = F'_{ВН} / 2 = 6,525 / 2 = 3,2625. \quad (77)$$

Тогда конечная сила возвратной пружины

$$F'_{ВК} = (1,15 \div 1,5) \cdot F_{ВН} = (1,15 \div 1,5) \cdot 6,525 = (7,504 \div 9,787). \quad (78)$$

Принимаем $F_{ВК}$ = 8,5 Н.

Рассчитываем предварительное значение жесткости пружины j, т.е. силу, которую развивает пружина на 1 мм прогиба. Согласно [2, с. 479, формула 22-29] жесткость пружины равна

$$j = \frac{F_{ВК} - F_{ВН}}{x_{\Sigma}} = \frac{4,25 - 3,262}{8} = 0,123 \text{ Н/мм.} \quad (79)$$

Определяем максимальную силу пружины при полном сжатии

$$Fm = \frac{F_{ВК}}{1-\alpha} = \frac{4,25}{1-0,2} = 5,3125 \text{ Н,} \quad (80)$$

где α – относительный инерционный зазор, для пружин α=(0,05÷0,20). Принимаем α = 0,2.

Максимальная деформация возвратной пружины

$$f_{М} = \frac{F_m}{j} = \frac{5,313}{0,123} = 43,038 \text{ мм.} \quad (81)$$

Определяем средний диаметр пружины

$$Д = \frac{f_{М}}{2 \div 4} = \frac{43,038}{2 \div 4} = 21,52 \div 10,76 \text{ мм.} \quad (82)$$

Предварительно принимаем Д = 10 мм.

Диаметр проволоки определяем по формуле [2, с. 479, формула 22-24]

$$d = 2\sqrt[3]{\frac{F_m \cdot Д}{\pi \cdot \sigma_{Д.КР.}}} = 2 \cdot \sqrt[3]{\frac{5,313 \cdot 10}{3,14 \cdot 350}} = 0,729 \text{ мм,} \quad (83)$$

согласно стандартному ряду значений, принимаем d = 0,4 мм.

Определяем индекс пружины [2, с. 478]. Индекс пружины, с – это параметр, который характеризует кривизну витка, определяющую концентрацию напряжений в материале пружины.

$$c = \frac{Д}{d} = \frac{10}{0,4} = 25. \quad (84)$$

Рассчитываем число витков согласно [2, с. 479, формула 22-25]

$$n = \frac{G \cdot d}{8 \cdot c^3 \cdot j} = \frac{8 \cdot 10^4 \cdot 0,73}{8 \cdot 25^3 \cdot 0,123} = 3,785. \quad (85)$$

Производим контрольный расчет. Определяем величину напряжения кручения при действии силы, принятых размерах и числе витков по [2, с. 478, формула 22-21] и сравниваем с допустимым

$$\sigma_{КР} = \frac{8 \cdot F_m \cdot c}{\pi \cdot d^2} = \frac{8 \cdot 5,313 \cdot 25}{3,14 \cdot 0,73^2} = 634,971 \text{ Н/мм}^2. \quad (86)$$

Полученное значение является меньше допустимого $\sigma_{КР} < \sigma_{Д.КР.}$. То есть расчет произведен верно.

Определяем параметры пружины.

Жесткость возвратной пружины согласно [2, с. 479, формула 22-29] также определяется как

$$j = \frac{G \cdot d}{8 \cdot c^3 \cdot n} = \frac{8 \cdot 10^4 \cdot 0,73}{8 \cdot 25^3 \cdot 4} = 0,117 \text{ Н/мм.} \quad (87)$$

Минимальная длина пружины: $l_{B(\min)} = d(n+1,5) = 0,73(4+1,5) = 4,015$ мм. (88)

Свободная длина: $l_{B(0)} = l_{B(\min)} + \frac{F_m}{j} = 4,015 + \frac{5,313}{0,117} = 49,499$ мм. (89)

Шаг навивки: $t = \frac{l_{B(0)} - l_{B(\min)}}{n} + \alpha = \frac{49,499 - 4,015}{4} + 0,2 = 11,571$ мм. (90)

Сила при отпущенном якоре: F_{BH} = 0,45 Н – неизменна.

Длина при отпущенном якоре:

$$l_{B.OT.} = l_{B(0)} - \frac{F_{B.H.}}{j} = 49,499 - \frac{3,262}{0,117} = 20,466 \text{ мм.} \quad (91)$$

Тогда при притянутом якоре длина пружины равна

$$l_{B.ПР.} = l_{B.OT.} - \Delta l_B = 20,466 - 8 = 12,466 \text{ мм,} \quad (92)$$

где Δl_B – рабочая деформация пружины, равна суммарному ходу якоря x_Σ.

Уточним силу при притянутом якоре

$$F_{BK} = (l_{B(0)} - l_{B.ПР.}) \cdot j = (49,499 - 12,466) \cdot 0,117 = 4,25 \text{ Н.} \quad (93)$$

С учетом того, что возвратных пружин две суммарные усилия создаваемых пружинами равны

$$F_{B.H.} = 2F_{B.H.} = 2 \cdot 3,262 = 6,525 \text{ Н,} \quad (94)$$

$$F_{B.H.} = 2F_{B.H.} = 2 \cdot 3,262 = 6,525 \text{ Н.} \quad (95)$$

4.3 Расчет контактной пружины

Материал контактной пружины принимаем аналогичный материалу возвратной пружины – сталь качественная рессорно-пружинная в прутках, ГОСТ 2052-53, круглая, горячей навивки, марка 65Г.

Контактная пружина работает на величине провала контактов. Рабочая деформация $\Delta l = x_{П} = 4$ мм.

С учетом формы контактов принимаем

$$F_{КН} = 2 \cdot F_{КН} = 2 \cdot 0,7 = 1,4 \text{ Н}, \; F_{КК} = 2 \cdot F_{К} = 2 \cdot 0,933 = 1,867 \text{ Н}. \quad (96)$$

Рассчитываем предварительное значение жесткости пружины

$$j = \frac{F_{КК} - F_{КН}}{x_{П}} = \frac{1,867 - 1,4}{4} = 0,117 \text{ Н/мм}. \quad (97)$$

Определяем максимальную силу пружины при полном сжатии

$$Fm = \frac{F_{КК}}{1 - \alpha} = \frac{1,867}{1 - 0,2} = 2,333 \text{ Н}, \quad (98)$$

где α – относительный инерционный зазор, для пружин $\alpha = (0,05 \div 0,20)$.

Принимаем α = 0,2 мм.

Максимальная деформация контактной пружины

$$f_{М} = \frac{F_{m}}{j} = \frac{2,333}{0,117} = 20 \text{ мм}. \quad (99)$$

Определяем средний диаметр пружины

$$Д = \frac{f_{М}}{2 \div 4} = \frac{20}{2 \div 4} = 10 \div 5 \text{ мм}. \quad (100)$$

Принимаем значение среднего диаметра Д = 10 мм.

Диаметр прутка

$$d = 2\sqrt[3]{\frac{F_{m} \cdot Д}{\pi \cdot \sigma_{Д.КР.}}} = 2 \cdot \sqrt[3]{\frac{2,333 \cdot 10}{3,14 \cdot 350}} = 0,554 \text{ мм}, \quad (101)$$

принимаем из стандартного ряда значений d =0,5 мм.

Определяем индекс пружины [2, с. 478]

$$c = \frac{Д}{d} = \frac{10}{0,5} = 20. \quad (102)$$

Рассчитываем число витков согласно [2, с. 479, формула 22-25]

$$\mathrm{n} = \frac{\mathrm{G} \cdot \mathrm{d}}{8 \cdot \mathrm{c}^3 \cdot \mathrm{j}} = \frac{8 \cdot 10^4 \cdot 0,5}{8 \cdot 6^3 \cdot 0,6} = 39. \quad (103)$$

Производим контрольный расчет. Определяем величину напряжения кручения при действии силы, принятых размерах и числе витков по [2, с. 478, формула 22-21] и сравниваем с допустимым

$$n = \frac{G \cdot d}{8 \cdot c^3 \cdot j} = \frac{8 \cdot 10^4 \cdot 0,5}{8 \cdot 20^3 \cdot 0,117} = 5,357 \approx 6 \text{ Н/мм}^2. \quad (104)$$

Полученное значение является меньше допустимого $\sigma_{КР} < \sigma_{Д.КР.}$.

Определяем параметры пружины.

Жесткость возвратной пружины согласно [2, с. 479, формула 22-29] также определяется как

$$j = \frac{G \cdot d}{8 \cdot c^3 \cdot n} = \frac{8 \cdot 10^4 \cdot 0,5}{8 \cdot 20^3 \cdot 6} = 0,104 \text{ Н/мм}. \quad (105)$$

Минимальная длина пружины: $l_{K(\min)} = d(n+1,5) = 0,5(6+1,5) = 3,75$ мм. (106)

Свободная длина: $l_{K(0)} = l_{K(\min)} + \frac{F_m}{j} = 3,75 + \frac{2,333}{0,104} = 26,1$ мм. (107)

Шаг навивки: $t = \frac{l_{К(0)} - l_{К(\min)}}{n} + \alpha = \frac{26,1 - 3,75}{6} + 0,2 = 3,933$ мм. (108)

Сила при отпущенном якоре: $F_{KH} = 1,4$ Н – неизменна.

Длина при отпущенном якоре:

$$l_{K.OT.} = l_{K(0)} - \frac{F_{K.H.}}{j} = 26,1 - \frac{1,4}{0,104} = 12,71 \text{ мм}. \quad (109)$$

Тогда длина пружины при притянутом якоре равна

$$l_{K.ПР.} = l_{K.OT.} - \Delta l_K = 12,71 - 4 = 8,71 \text{ мм}, \quad (110)$$

где $\Delta l_К$ – рабочая деформация пружины, равна провалу контактов $x_П$.

Уточним силу при притянутом якоре

$$F_{КК} = (l_{К(0)} - l_{К.ПР.}) \cdot j = (19,75 - 14,6) \cdot 0,9 = 4,6 \text{ Н}. \quad (111)$$

Определяем суммарные усилия создаваемые контактными пружинами в цепи главных контактов:

$$F_{K.H.} = 3F_{K.H.} = 3 \cdot 1,4 = 4,2 \text{ Н}, \quad (112)$$

$$F_{KK.} = 3F_{K.K.} = 3 \cdot 1,817 = 5,45 \text{ Н}. \quad (113)$$

Механическая характеристика представлена на рисунке 11.

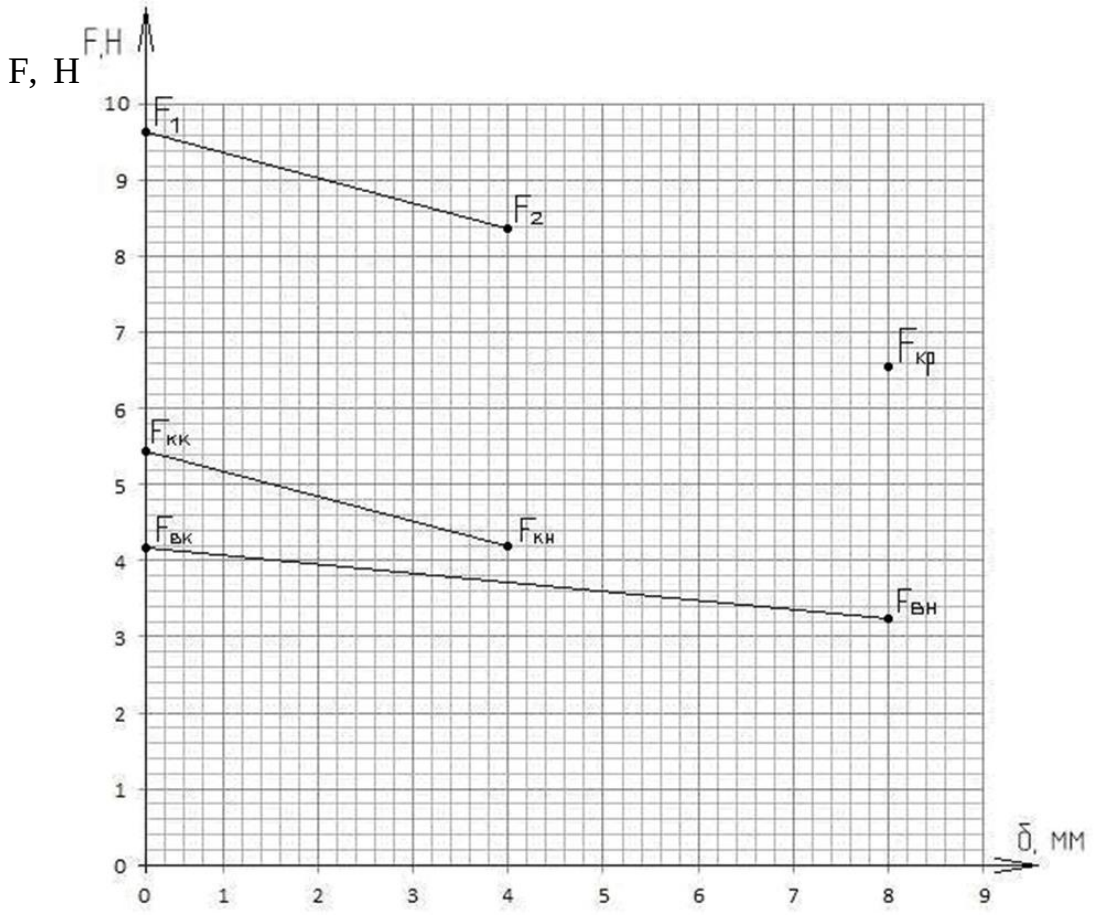


Рисунок 11 – Механическая характеристика

Определяем критическую точку:

1) $F_1 \cdot \delta^2 = (F_{кк} + F_{вк}) \cdot \alpha^2 = (5,45 + 4,197) \cdot 0,2^2 = 0,386$ Н·мм², (114)

2) $F_2 \cdot \delta^2 = 8,397 \cdot 4^2 = 134,352$ Н·мм², (115)

3) $F_{ВН} \cdot \delta^2 = 3,262 \cdot 8^2 = 208,768$ Н·мм², (116)

Точка $F_{ВН}$ является критической, производим приведение критической точки на начальный зазор.

Точка 3 является критической, производим приведение критической точки на начальный зазор.

$$F_{Кр} = F_{ВН} \cdot \frac{\delta_Н}{\delta_{ПР}} = 3,262 \cdot \frac{8}{4} = 6,525 \text{ Н.} \quad (117)$$

5 РАСЧЕТ ОСНОВНЫХ РАЗМЕРОВ СЕРДЕЧНИКА И КАТУШКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Чтобы обеспечить надежность работы электромагнита критическая электромагнитная сила должна немного превышать соответствующую этому зазору противодействующую силу, т.е. $F_0 = k \cdot F_{ПР}$. Исходя из опыта проектирования и эксплуатации электромагнитов значение коэффициента запаса k для наиболее неблагоприятных условий эксплуатации пускателей рекомендуется [4, с. 12] принимать k = 1,3.

$$F_0 = k \cdot F_{ПР} = 1,3 \cdot 6,525 = 8,48 \quad (118)$$

Требования, которые предъявляются к электромагнитам в различных областях техники, привели к образованию большого разнообразия конструктивных форм и исполнений электромагнитов.

Широкое распространение нашли электромагниты с прямолинейным перемещение якоря. Такой вид электромагнитов целесообразно применять при большом ходе механизма, а, следовательно, и якоря.

Имеется метод выбора оптимальной конструктивной формы по геометрическому показателю, основанный на ряде выполненных расчетов и экспериментов по электромагнитам различных конструктивных форм.

Геометрический показатель для электромагнитов переменного тока определяется по [2, с. 256, формула 10-1]

$$\Gamma = \frac{\sqrt{2 \cdot F_0}}{\delta_H} = \frac{\sqrt{2 \cdot 8,48}}{8 \cdot 10^{-3}} = 8236,5 \text{ Н}^{0,5}/\text{м} \quad (119)$$

Каждой конструктивной форме электромагнита, спроектированного оптимально по экономичности в отношении массы, соответствует определенный диапазон Г, при котором удельный расход материала является наименьшим. Согласно [2, с. 257, табл. 10-2] для электромагнитов переменного тока при $\Gamma = 316 \div 25000$ $\text{Н}^{0,5}/\text{м}$, целесообразно принимать электромагнит – шихтованный из штампованных пластин с прямоходовым Ш-образным якорем и броневой.

Для изготовления магнитопроводов применяют магнитомягкие низкоуглеродистые материалы. Для аппаратов переменного тока почти исключительно – кремнистые электротехнические стали. Принимаем магнитопровод выполненный из холоднокатаной листовой электротехнической стали марки Э310 толщиной 0,5 мм.

При предварительном расчете размеров сердечника магнитопровода величину индукции в рабочем воздушном зазоре при отпущенном якоре ориентировочно выбираем по величине геометрического показателя по графикам [2, с. 267, рис. 10-9]. Принимаем $B_\delta = 0{,}1$ Тл.

Для расчета площади используется уравнение электромагнитной силы Максвелла. Для электромагнитов переменного тока площадь сечения определяется по [2, с. 275, формула 10-7]

$$S = \frac{F_0}{19{,}9 \cdot 10^4 \cdot B_\delta} = \frac{8{,}48}{19{,}9 \cdot 10^4 \cdot 0{,}1} = 1{,}829 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2. \quad (120)$$

Оптимальное соотношение сторон прямоугольного сечения сердечника для шихтованных магнитопроводов a/b=1 [2, с. 277], по условиям работы и изготовления катушки магнитопровода. Таким образом, с учетом того, что согласно [2, с. 277, формула 10-12]

$$a_C = \frac{S}{k_{З.СТ.} \cdot b_C} = \frac{1{,}829 \cdot 10^{-4}}{0{,}95 \cdot b_C} = 1{,}925 \cdot 10^{-4} \Big/ b_C, \quad (121)$$

где $k_{З.СТ.}$ – коэффициент заполнения сечения пакета сталью, учитывающий изоляционные слои окалины и лака; для листов толщиной 0,5 мм $k_{З.СТ.} = 0{,}95$ [2, с. 277] получаем размеры сердечника равные a = b = 15 мм.

Определяем размеры катушки

Высота обмотки: $h_{ОБ} = \eta \cdot a = 0{,}8 \cdot 15 = 12$ мм, (122)

где η – безразмерный коэффициент, $\eta = 0{,}5 \div 0{,}8$ [5, с. 161].

Длина обмотки: $l_{ОБ} = \xi \cdot h_{ОБ} = 2{,}5 \cdot 12 = 30$ мм, (123)

где ξ – безразмерный коэффициент $\xi = 1{,}5 \div 3$ [5, с. 162].

Изоляционный зазор: $\Delta = \nu \cdot a = 0{,}2 \cdot 15 = 3$ мм, (124)

где $\nu = 0{,}2 \div 0{,}5$ – отношение изоляционного зазора к главному размеру.

Ширина крайних полюсов: $a_1 = U \cdot a = 0{,}5 \cdot 16 = 9$ мм, (125)

где $U = 0{,}55 \div 0{,}65$ – отношение ширины бокового полюса к ширине главного полюса.

Ширина окна:

$c = h_{ОБ} + \Delta = (\eta + \nu) \cdot a = (0{,}8 + 0{,}2) \cdot 15 = 15$ мм. (126)

Высота окна:

$$H = H_1 + H_2 = (\xi \cdot \eta + 1.5 \cdot \nu) \cdot a = (2{,}5 \cdot 0{,}8 + 1{,}5 \cdot 0.2) \cdot 15 = 34{,}5 \text{ мм}, \quad (127)$$

Принимаем из прототипа отношение $H_1 : H_2 \approx 1:2$, тогда

$H_1 = 10$ мм, $H_2 = 24{,}5$ мм.

На рисунке 12 изображен эскиз электромагнита в соответствии с полученными результатами расчета.

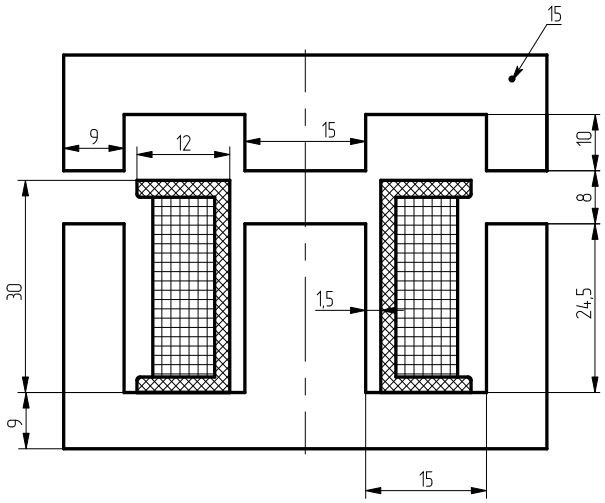


Рисунок 12 – Эскиз электромагнита, мм

6 РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ

Расчет магнитной цепи без учета потерь в стали и экране – прямая задача.

6.1 Расчет магнитных проводимостей и их производных

Некоторые формы воздушных зазоров являются общими для большого количества магнитных систем электрических аппаратов. Для них имеются аналитические выражения магнитной проводимости, учитывающие как потоки выпучивания, так и потоки боковых поверхностей. Расчет проводимостей воздушного зазора будем производить методом суммирования простых объемных фигур поля, предложенный Ротерсом. Данный метод получил достаточно большое распространение на практике.

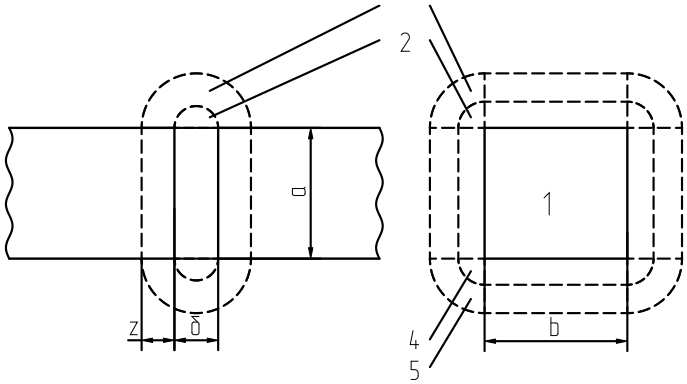


Рисунок 13 – Разбиение на простые фигуры плоских прямоугольных полюсов, 1 – параллельные плоскости (без учета проводимости краевого потока), 2 – половина сплошного цилиндра, 3 – половина полого цилиндра, 4 – сферический квадрант, 5 – квадрант сферической оболочки.

Суммарная проводимость центрального зазора определяется как арифметическая сумма параллельных проводимостей участков:

$$G_{\delta 1} = \mu_0 \cdot \left(\frac{a \cdot b}{\delta} + 0{,}52 \cdot (a + b) + 0{,}307 \cdot \delta + \frac{2 \cdot (a + b)}{\pi} \cdot \ln\left(\frac{\delta + 2 \cdot m}{\delta} \right) + m \right) =$$

$$= 4 \cdot \pi \cdot 10^{-10} \left(\frac{16^2}{7} + 0{,}52 \cdot (2 \cdot 16) + 0{,}307 \cdot 7 + \frac{2 \cdot (1{,}5 \cdot 15)}{\pi} \cdot \ln\left(\frac{7 - 2 \cdot 2{,}2}{7} \right) + 2{,}2 \right) =$$

$$= 8{,}5\cdot 10^{-8}\ \text{Г}. \tag{128}$$

где m – размер выпучивания

$$m = \frac{c-\delta}{\pi} = \frac{0{,}014-0{,}007}{\pi} = 2{,}2\cdot 10^{-3}\ \text{м}. \tag{129}$$

Проводимость бокового зазора:

$$G_x = \mu_0 \cdot \left(\frac{x\cdot b}{\delta} + 0{,}52\cdot(x+b) + 0{,}307\cdot\delta + \frac{2\cdot(x+b)}{\pi}\cdot\ln\left(\frac{\delta+2\cdot m'}{\delta}\right) + m' \right) =$$

$$= 4\cdot\pi\cdot 10^{-10}\cdot\left(\frac{1{,}5\cdot 15}{7} + 0{,}52\cdot(1{,}5+15) + 0{,}307\cdot 7 + \frac{2\cdot(1{,}5+15)}{\pi}\cdot\ln\left(\frac{7+2\cdot 33}{7}\right) + 33 \right) =$$

$$= 9{,}5\cdot 10^{-8}\ \text{Г}. \tag{130}$$

где m' – размер выпучивания для крайних кернов

$$m' = H_1 + a_1 = 0{,}0245 + 0{,}009 = 0{,}033\ \text{м}; \tag{131}$$

$$x = 2\cdot a_1 - a = 2\cdot 0{,}009 - 0{,}015 = 2\cdot 10^{-3}\ \text{м}. \tag{132}$$

Рассчитываем полную магнитную проводимость двух крайних зазоров:

$$G_{\delta 2} = G_{\delta 1} + G_x = 8{,}5\cdot 10^{-8} + 9{,}5\cdot 10^{-8} = 18{,}0\cdot 10^{-8}\ \text{Г/м}. \tag{133}$$

Рассчитываем первую производную по величине воздушного зазора.

Для центрального зазора

$$\frac{dG_{\delta 1}}{d\delta} = -\mu_0\cdot\left(\frac{a\cdot b}{\delta^2} - 0{,}307 + \frac{2\cdot(a+b)\cdot 2\cdot m}{\pi\cdot\delta\cdot(\delta+2\cdot m)} \right) = -6{,}7\cdot 10^{-6}\ \text{Г/м}. \tag{134}$$

Для боковых зазоров

$$\frac{dG_x}{d\delta} = -\mu_0\cdot\left(\frac{x\cdot b}{\delta^2} - 0{,}307 + \frac{2\cdot(x+b)\cdot 2\cdot m'}{\pi\cdot\delta\cdot(\delta+2\cdot m')} \right) = -1{,}0\cdot 10^{-6}\ \text{Г/м}. \tag{135}$$

$$\left|\frac{dG_{\delta 2}}{d\delta}\right| = \left|\frac{dG_{\delta 1}}{d\delta} + \frac{dG_x}{d\delta}\right| = \left|-6{,}7\cdot 10^{-6} - 1{,}0\cdot 10^{-6}\right| = 7{,}7\cdot 10^{-6}\ \text{Г/м}. \tag{136}$$

Удельную проводимость рассеяния между внедряющейся частью якоря и ярмом определяем по методу Ротерса [6, с. 6]:

$$g = \mu_0 \left(\frac{2 \cdot b}{c} + 4 \cdot 0.26 + \frac{b}{\pi \cdot (2 \cdot c/a + 1)} \right) =$$

$$= 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \left(\frac{2 \cdot 0,015}{0,015} + 4 \cdot 0,26 + \frac{0,015}{\pi \cdot (2 \cdot 0,015/0,015 + 1)} \right) = 4,2 \cdot 10^{-6} \text{ Г/м.} \quad (137)$$

Расчет проводимости рассеяния [6, с. 6]:

$$G_{\sigma 1} = \frac{g \cdot H_1}{2} = \frac{4,2 \cdot 10^{-6} \cdot 0,0245}{2} = 5,0 \cdot 10^{-8} \text{ Г;} \quad (138)$$

$$G_{\sigma 2} = \frac{g \cdot H_2}{2} = \frac{4,2 \cdot 10^{-6} \cdot 0,01}{2} = 2,5 \cdot 10^{-8} \text{ Г.} \quad (139)$$

Результирующая проводимость:

$$G_{1P} = G_{\delta 1} + G_{\sigma 1} = 8,5 \cdot 10^{-8} + 5,0 \cdot 10^{-8} = 13,5 \cdot 10^{-8} \text{ Г;} \quad (140)$$

$$G_{2P} = G_{\delta 2} + G_{\sigma 2} = 18,0 \cdot 10^{-8} + 2,5 \cdot 10^{-8} = 20,5 \cdot 10^{-8} \text{ Г.} \quad (141)$$

Коэффициенты рассеяния у зазоров [6, с. 6]:

$$\sigma_1 = 1 + \frac{G_{\sigma 1}}{G_{\delta 1}} = 1 + \frac{5,0}{8,5} = 1,59, \ \sigma_2 = 1 + \frac{G_{\sigma 2}}{G_{\delta 2}} = 1 + \frac{2,5}{18,0} = 1,14. \quad (142)$$

Рассчитываем первую производную рассеяния:

$$\frac{dG_\sigma}{d\delta} = -\mu_0 \cdot \frac{0,64 \cdot 4 \cdot (a + b)}{\left(\frac{\delta}{z} + 1 \right)^2} = -4 \cdot \pi \cdot 10^{-10} \cdot \frac{0,64 \cdot 4 \cdot 1,5 \cdot 15}{(1+1)^2} = -2,6 \cdot 10^{-8} \text{ Г/м,} \quad (143)$$

где $z = \delta$ [2, с. 297].

6.2 Расчет тяговой характеристики

Определяем магнитный поток [2, с. 343, формула 13-1]:

$$\Phi_{\delta.\text{ОТ}} = \sqrt{\frac{\sqrt{2}\cdot F_{\text{Кр}}\cdot G_{\delta 1}{}^2}{0,25\cdot\left(\left|\frac{dG_{\delta 1}}{d\delta}+\frac{1}{3}\cdot\frac{dG_{\sigma}}{d\delta}\right|\right)}} = \sqrt{\frac{\sqrt{2}\cdot 6,525\cdot\left(8,5\cdot 10^{-8}\right)^2}{0,25\cdot\left(6,7\cdot 10^{-6}+\frac{1}{3}\cdot 2,6\cdot 10^{-8}\right)}} = 4,7\cdot 10^{-4}\ \text{Вб}. \quad (144)$$

Средний магнитный поток срабатывания [2, с. 343]:

$$\Phi_{\delta} = \Phi_{\delta.\text{ОТ}}\cdot\sigma_1 = 2,7\cdot 10^{-4}\cdot 1,14 = 3,1\cdot 10^{-4}\ \text{Вб}.$$

Тяговое усилие при начальном зазоре без учета усилия от магнитных потоков рассеяния (заниженное значение) [6, с. 6]:

$$F_{\text{Э}} = \Phi_{\delta}{}^2\cdot C_F = \left(3,1\cdot 10^{-4}\right)^2\cdot 2,1\cdot 10^8 = 25,4\ \text{Н}, \quad (145)$$

где $$C_F = \frac{1}{4}\left[\left(\frac{1}{G_{\delta 1}}\right)^2\cdot\frac{dG_{\delta 1}}{d\delta}+\left(\frac{1}{G_{\delta 2}}\right)^2\cdot\frac{dG_{\delta 2}}{d\delta}\right] =$$

$$= \frac{1}{4}\left[\left(\frac{1}{8,5\cdot 10^{-8}}\right)^2\cdot 6,7\cdot 10^{-6}+\left(\frac{1}{18,0\cdot 10^{-8}}\right)^2\cdot 7,7\cdot 10^{-6}\right] = 2,1\cdot 10^8\ \text{Н}/\text{Вб}^2. \quad (146)$$

Производим расчет характеристики, для этого по расчету, приведенному выше, определяем тяговое усилие для нескольких значений воздушного зазора. Расчеты сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Сводная таблица

δ	m	$G_{\delta 1}$	G_x	$G_{\delta 2}$	$\frac{dG_{\delta 1}}{d\delta}$	$\frac{dG_x}{d\delta}$	$\frac{dG_{\delta 2}}{d\delta}$	C_F	$F_{\text{Э}}$
10^{-3} м	10^{-3} м	10^{-8} Г/м	10^{-8} Г/м	10^{-8} Г/м	10^{-6} Г/м	10^{-6} Г/м	10^{-6} Г/м	10^8 Н/Вб^2	Н
8	2,2	8,5	9,5	18,0	6,7	1,0	7,7	1,5	14,0
6,4	2,7	10,1	9,9	20,0	10,5	1,5	12,0	1,6	15,5
4,2	3,1	12,6	10,5	23,1	18,5	2,5	21,0	1,8	16,4
2,8	3,6	17,4	11,5	28,9	41,4	5,4	46,8	2,05	18,6
1,4	4,0	30,5	13,8	44,3	164,6	20,7	185,4	2,3	22,3

Продолжение таблицы 1

0,7	4,2	55,2	17,7	72,8	657,1	82,3	739,4	2,8	24,5

0,2	4,4	173,2	33,8	207,0	8043,0	1005,5	9048,6	2,1	25,4

На рисунке 12 представлена тяговая характеристика, построенная на основе произведенного расчета.

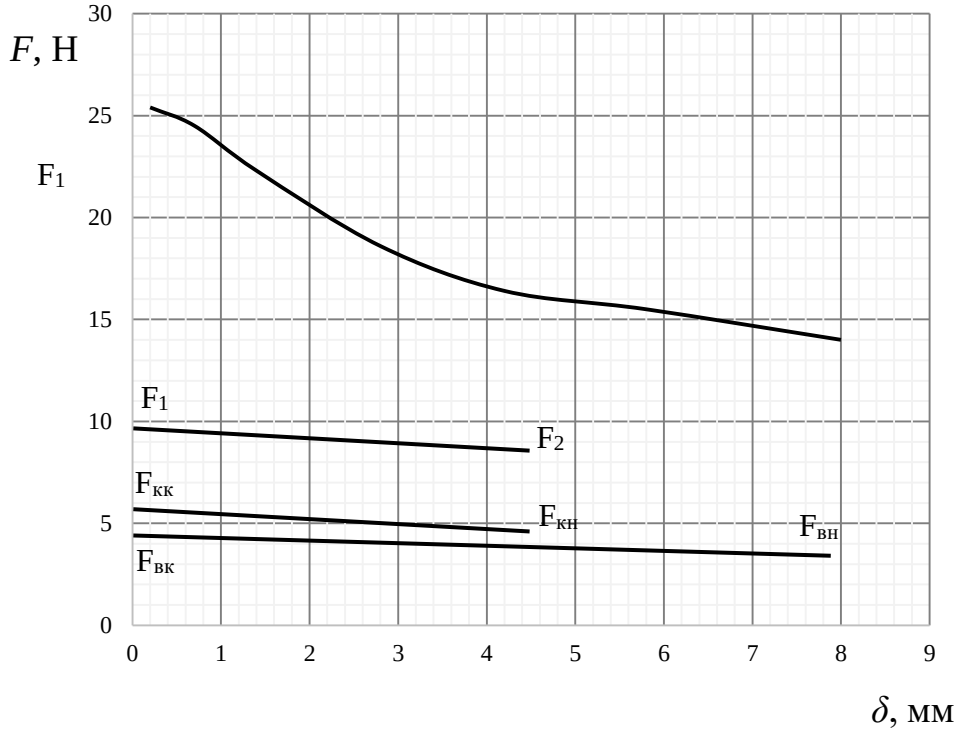


Рисунок 14 – Тяговая характеристика

7 РАСЧЕТ КАТУШКИ

Для аппаратов переменного тока число витков катушки можно определить исходя из условия удержания [2, с. 371, формула 14-11]

$$w = \frac{E}{4,44 \cdot f \cdot \Phi_m} = \frac{380}{4,44 \cdot 50 \cdot 4,6 \cdot 10^{-4}} = 3700 \text{ витков}, \quad (147)$$

где E – электродвижущая сила катушки, в первом приближении можно принять E=U;

Φ_m – поток при притянутом якоре

$$\Phi_m = B_m \cdot S_{CT} = 1,8 \cdot 2,25 \cdot 10^{-4} = 4,6 \cdot 10^{-4} \text{ Вб}, \quad (148)$$

где S_{CT} – площадь стали

$$S_{CT} = a \cdot b = 0.015^2 = 2,25 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2, \quad (149)$$

B_m – допустимая индукция в стали

B_m = 1,8 Тл, для выбранной стали рассчитанного сечения.

Намагничивающая сила катушки:

$$Iw = \frac{\Phi_m}{G_m} = \frac{4,6 \cdot 10^{-4}}{8,2 \cdot 10^{-8}} = 5620 \text{ А}, \quad (150)$$

где G_m – суммарная проводимость магнитной цепи

$$G_m = \frac{G_{1P} \cdot G_{2P}}{G_{1P} + G_{2P}} = \frac{13,5 \cdot 10^{-8} \cdot 20,5 \cdot 10^{-8}}{13,5 \cdot 10^{-8} + 20,5 \cdot 10^{-8}} = 8,2 \cdot 10^{-8} \text{ Г}. \quad (151)$$

Так как величина Е пока неизвестна, то, начиная со значения Е = U = 380 В, рассчитываем параметры катушки в первом приближении, а затем уточнив величину Е, уточним число витков катушки пока не будет выполнено условие

$$\left(w^{(K)} - w^{(K+1)} \right) / w^{(K)} \le \varepsilon_{ДОП}, \quad (152)$$

где $\varepsilon_{ДОП}$ – допустимая относительная погрешность расчета, которую принимаем (0,03÷0,05).

Рассчитываем геометрические размеры катушки. В данном электрическом аппарате применяется каркасное исполнение катушки.

С целью уменьшения расхода активных материалов окно должно быть заполнено практически полностью с необходимыми зазорами Δ =(1÷2) мм. Принимаем Δ =1 мм.

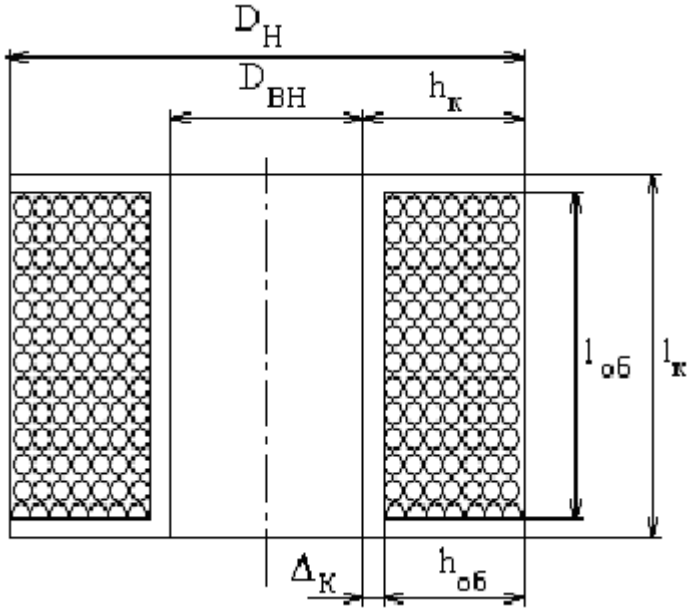


Рисунок 15 – Эскиз катушки

$\Delta_К$ – толщина каркаса, принимается конструктивно в пределах (1÷5) мм, принимаем опираясь на прототип $\Delta_К = 2$ мм.

Длина намотки $l_Н = l - 2\Delta - 2\Delta_К = 30 - 2\cdot 1 - 2\cdot 2 = 24{,}5$ мм. (153)

Длина катушки $l_К = l - 2\Delta = 30 - 2 = 28$ мм. (154)

Высота катушки $h_К = c - 2\cdot\Delta = 14 - 2\cdot 1 = 12$ мм. (155)

Высота намотки $h_Н = h_К - \Delta - \Delta_К = 12 - 1 - 2 = 9$ мм. (156)

Средняя длина витка $l_{СР} = 4\cdot К + \pi\cdot h_Н = 4\cdot 22 + \pi\cdot 9 = 116$ мм, (157)

где $К = a + 2\Delta + 2\Delta_К = 16 + 2\cdot 1 + 2\cdot 2 = 22$ мм. (158)

Предварительно принимаем коэффициент заполнения обмотки $К_m = 0{,}7$, коэффициент укладки при рядовой намотке принимаем $К_у = 0{,}9$.

Определяем число витков в первом приближении

$$w' = \frac{U}{4{,}44\cdot f\cdot \Phi_m} = \frac{380}{4{,}44\cdot 50\cdot 4{,}6\cdot 10^{-4}} = 3710 \text{ витков.} \quad (159)$$

Диаметр изолированного провода без учета прокладки между рядами

$$d'_{ИЗ} = \sqrt{\frac{h_Н\cdot l_Н\cdot К_у}{w'}} = \sqrt{\frac{9\cdot 24\cdot 0{,}9}{3710}} = 0{,}23 \text{ мм,} \quad (160)$$

тогда диаметр изолированного проводника

$$d_{ИЗ} = d'_{ИЗ} - \Delta_{ПР}/2 = 0{,}23 - 0{,}04/2 = 0{,}21 \text{ мм,} \quad (161)$$

где $\Delta_{ПР}$ – толщина прокладки, принимаем равной $\Delta_{ПР} = 0{,}04$ мм.

Для провода ПЭТВ принимаем ближайший меньший диаметр изолированного провода [11, с. 135, табл. П.17] $d_{ИЗ} = 0{,}21$ мм, $d = 0{,}18$ мм, сечение выбранного провода $g = 0{,}0255$ мм^2.

Сопротивление обмотки при установившейся температуре

$$r = \rho_{cu}\cdot\frac{l_{СР}\cdot w'}{g} = 2{,}07\cdot 10^{-8}\cdot\frac{116\cdot 10^{-3}\cdot 3710}{0{,}0255\cdot 10^{-6}} = 350 \text{ Ом,} \quad (162)$$

где ρ_{cu} – удельное электрическое сопротивление меди при 75 ^{0}С.

$$\rho_{cu} = \rho_0\cdot(1 + \alpha\cdot T) = 1{,}62\cdot 10^{-8}\cdot(1 + 0{,}0043\cdot 75) = 2{,}07\cdot 10^{-8} \text{ Ом·м,} \quad (163)$$

где $\rho_0 = 1,62 \cdot 10^{-8}$ Ом·м – удельное электрическое сопротивление меди при 0 °С.

Ток в обмотке

$$I = \left(Iw\right) \Big/ \sqrt{2} \cdot w^{/} = 5620 \Big/ \sqrt{2} \cdot 3710 = 1,07 \text{ А}. \quad (164)$$

Электродвижущая сила обмотки

$$E = \sqrt{U^2 - (I \cdot r)^2} = \sqrt{380^2 - (1,07 \cdot 349)^2} = 375 \text{ В}. \quad (165)$$

По величине Е определяем число витков (второе приближение) и проверяем выполнение условия.

$$w^{//} = \frac{E}{4,44 \cdot f \cdot \Phi_m} = \frac{375}{4,44 \cdot 50 \cdot 4,6 \cdot 10^{-4}} = 3670 \text{ витков}. \quad (166)$$

$$\frac{w^{/} - w^{//}}{w^{/}} = \frac{3710 - 3670}{3710} = 0,01 \le \left(0,03 \div 0,05\right). \quad (167)$$

Условие выполняется.

8 ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ЭКРАНА

Чтобы не было вибрации якоря, минимальное значение пульсирующей электромагнитной силы притяжения якоря должно быть всегда больше суммы противодействующих сил, отрывающих якорь в его притянутом состоянии. Это достигается установкой экрана, разделяющего площадь торца $s_Т$ стержня магнитопровода на экранированную $s_Э$ и неэкранированную $s_Н$ части так, чтобы получить необходимые величины потоков $\Phi_Э$ и $\Phi_Н$, магнитной индукции $B_Э$ и $B_Н$, минимальные потери в экране $P_Э$.

У электромагнитов с тремя стержнями наибольшее распространение имеет расположение экранов на крайних стержнях. В этом случае имеется два больших преимущества. Во-первых, не происходит нагрев катушки, во-вторых, на центральном стержне легко сделать зазор отлипания.

Производим расчет экрана по отношению допустимой минимальной электромагнитной силы к среднему значению силы при отсутствии экрана (метод А.В. Шорыгина – Г.В. Могилевского). Расчет ведем для одного экранирующего витка.

Магнитный поток в рабочем зазоре с учетом конструкции магнитопровода [2, с. 343]

$$\Phi_{\delta ПР} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{СР}}{\sigma_{ср.пр} \cdot \omega \cdot w \cdot n_{\delta}} = \frac{\sqrt{2} \cdot 378}{1{,}05 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 3670 \cdot 2} = 2{,}2 \cdot 10^{-4} \text{ Вб}, \quad (168)$$

где $\sigma_{ср.пр} = 1{,}05$ – коэффициент выпучивания [2, с. 344],

n_{δ} – коэффициент, учитывающий конструкцию магнитопровода, для Ш-образного магнитопровода, в котором поток проходит по боковым зазорам $n_{\delta} = 2$.

Определяем минимально допустимую силу притяжения на один зазор по [5, с. 132, формула 2-91]

$$F_{min} = 1 \cdot \frac{F_0}{2} = 1 \cdot \frac{21{,}84}{2} = 10{,}9 \text{ Н}. \quad (169)$$

Предварительно принимаем размеры короткозамкнутого витка равными ширина $\Delta_Э = 1{,}5$ мм, высота $h_Э = (1{,}5 \div 2) \cdot \Delta_Э = 2{,}6$ мм. Высоту паза принимаем больше высоты витка, так как в процессе работы при нагреве витка происходит увеличение его объема. Принимаем высоту паза согласно прототипу $h_П = 3$ мм.

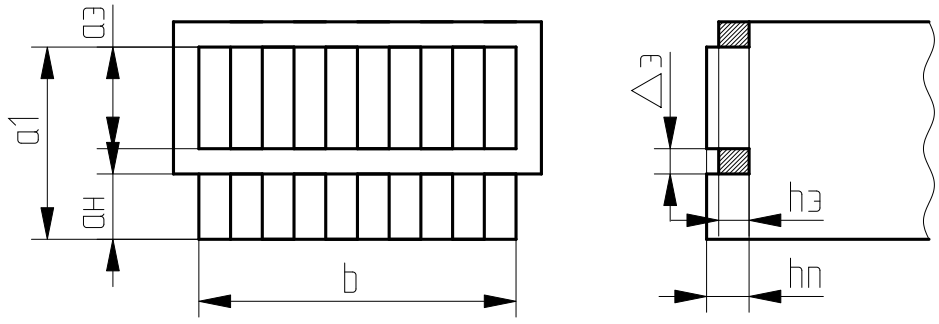


Рисунок 16 – Эскиз электромагнитного экрана

$$a_Н + a_Э = a_1 - \Delta_Э = 9 - 1{,}5 = 7{,}5 \text{ мм}. \quad (170)$$

Суммарная площадь в зазоре без учета площади экрана равна:

$$S_{Н+Э} = (a_Н + a_Э) \cdot b = 7{,}5 \cdot 15 = 112{,}5 \text{ мм}^2. \quad (171)$$

Отношение неэкранированной и экранированной частей торца полюса выбираем из рекомендуемых пределов $\alpha = (0{,}5 \div 0{,}6)$, принимаем $\alpha = 0{,}5$. Тогда

$$\alpha = {a_Н}/{a_Э} = {2{,}5}/{5{,}0} = 0{,}5. \quad (172)$$

Рассчитываем площади частей сечения керна:

неэкранированной $S_Н = a_Н \cdot b = 2{,}5 \cdot 15 = 37{,}5 \text{ мм}^2$, (173)

экранированной $S_Э = a_Э \cdot b = 5 \cdot 15 = 75 \text{ мм}^2$. (174)

Длина короткозамкнутого витка по средней линии

$$l_{ср.Э} = \frac{П_Н + П_{ВН}}{2} = \frac{54 + 42}{2} = 48 \text{ мм}, \quad (175)$$

где $П_Н$ – наружный периметр витка;

$П_{ВН}$ – внутренний периметр короткозамкнутого витка.

$$П_Н = 2 \cdot (b + a_Э + 4 \cdot \Delta_Э) = 2 \cdot (15 + 5 + 4 \cdot 1{,}5) = 54 \text{ мм} \quad (176)$$

$$П_{ВН} = 2 \cdot (b + a_Э) = 2 \cdot (16 + 5) = 42 \text{ мм}. \quad (177)$$

Принимаем материал короткозамкнутого витка – медь.

Токи, протекающие в витке, нагревают его до (100-150) ^{0}C. Определяем удельное сопротивление при температуре T =120 ^{0}C

$$\rho = \rho_0 \cdot (1 + \alpha \cdot T) = 1{,}62 \cdot 10^{-8} \cdot (1 + 0{,}0043 \cdot 120) = 2{,}66 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м} \quad (178)$$

где ρ_{20} – удельное сопротивление КЗ витка данной марки при 20 ^{0}C, [2, с. 382, табл. 15-3];

α – температурный коэффициент сопротивления [2, с. 383], в расчетах для меди принимают $\alpha = 0{,}0043 \ 1/°C$.

Отношение допустимой минимальной электромагнитной силы к среднему значению этой силы [2, с. 347]:

$$f_Э = \frac{2}{4 \cdot \alpha + 1} = 0,67. \quad (179)$$

Активное электрическое сопротивление экрана

$$r_Э = \frac{\omega \cdot \mu_0 \cdot S_{Н+Э}}{\delta_{пр}} \cdot \frac{4 \cdot f_Э}{(3 \cdot f_Э + 2)^2} \cdot \sqrt{4 - f_Э^2} =$$

$$= \frac{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 120 \cdot 10^{-6}}{0,2 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{4 \cdot 0,67}{(3 \cdot 0,67 + 2)^2} \cdot \sqrt{4 - 0,67^2} = 74 \text{ мОм}. \quad (180)$$

Индуктивное магнитное сопротивление экранированной части

$$X_М = \frac{2 \cdot \pi \cdot f}{r_Э} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 50}{74 \cdot 10^{-3}} = 4,2 \cdot 10^3 \text{ 1/Гн}. \quad (181)$$

Фазный угол сопротивления экрана [2, с. 348, формула 13-7]

$$\operatorname{tg}\psi = \frac{\omega \cdot G_Э}{r_Э} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 5,0 \cdot 10^{-4}}{74 \cdot 10^{-3}} = 2,13, \text{ откуда } \psi = \operatorname{arctg}(2,13) = 65°, \quad (182)$$

где $$G_Э = \frac{\mu_0 \cdot S_Э}{\delta_{пр}} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 80 \cdot 10^{-6}}{0,2 \cdot 10^{-3}} = 5,0 \cdot 10^{-4} \text{ Гн}. \quad (183)$$

Для упрощения расчетов примем $$C_Ф = \frac{\Phi_Н}{\Phi_Э} = \frac{\alpha}{\cos\psi} = \frac{0,5}{0,42} = 1,18. \quad (184)$$

Определяем поток проходящий через экранированную площадь полюса [2, с. 348, формула 13-8]

$$\Phi_Э = \frac{\Phi_{\delta ПР}}{\sqrt{1 + 2 \cdot C_Ф \cdot \cos\psi + C_Ф{}^2}} = \frac{2,2 \cdot 10^{-4}}{\sqrt{1 + 2 \cdot 1,18 \cdot 0,42 + 1,18^2}} = 1,2 \cdot 10^{-4} \text{ Вб}, \quad (185)$$

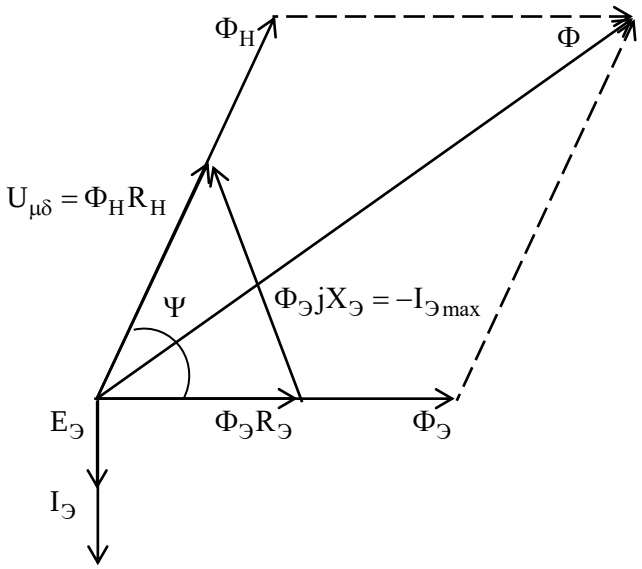
тогда поток проходящий через неэкранированную часть равен

$$\Phi_Н = C_Ф \cdot \Phi_Э = 1,18 \cdot 1,2 \cdot 10^{-4} = 1,4 \cdot 10^{-4} \text{ Вб}. \quad (186)$$

По эмпирическим формулам [2, с. 348, формулы 13-10 – 13-12] определяем электромагнитную силу в экранированной и неэкранированной частях полюса, амплитудное, среднее и минимальное значение силы.

$$F_{\delta Э} = \frac{19,9 \cdot 10^4 \cdot \Phi_{\delta Э}^2}{S_Э} = \frac{19,9 \cdot 10^4 \cdot (1,2 \cdot 10^{-4})^2}{75 \cdot 10^{-6}} = 25,8 \text{ Н}. \quad (187)$$

$$F_{\delta H} = \frac{19{,}9 \cdot 10^4 \cdot \Phi_{\delta H}^2}{S_H} = \frac{19{,}9 \cdot 10^4 \cdot (1{,}4 \cdot 10^{-4})^2}{37{,}5 \cdot 10^{-6}} = 39{,}4 \text{ Н}. \quad (188)$$



Максимальная сила в полюсе с экраном

$$F_m = \sqrt{F_{\delta Э}^2 + F_{\delta H}^2 + 2 \cdot F_{\delta Э} \cdot F_{\delta H} \cdot \cos 2\psi} = \\ = \sqrt{25{,}8^2 + 39{,}4^2 + 2 \cdot 35{,}8 \cdot 99{,}4 \cdot (-0{,}64)} = 34{,}3 \text{Н} \quad (189)$$

Среднее значение силы в полюсе

$$F_{CP} = F_{\delta Э} + F_{\delta H} = 25{,}8 + 39{,}4 = 65{,}2 \text{ Н}. \quad (190)$$

Минимальная сила равна

$$F_{min} = F_{CP} - F_m = 135{,}2 - 81{,}3 = 30{,}9 \text{ Н}. \quad (191)$$

Минимальное значение пульсирующей электромагнитной силы притяжения якоря больше меньше суммы противодействующих сил, отрывающих якорь в его притянутом состоянии. Это означает, что нет вибрации якоря. Электромагнитный экран рассчитан верно.

Рисунок 17 – Векторная диаграмма экрана

9 РАСЧЕТ МАГНИТНОЙ ЦЕПИ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ СТАЛИ И КОРОТКОЗАМКНУТОГО ВИТКА

Данная магнитная цепь является симметричной относительно оси катушки, поэтому расчет можно провести для одной половины цепи. Схема замещения показана на рисунке 16. Расчет производим по методике предложенной в [6].

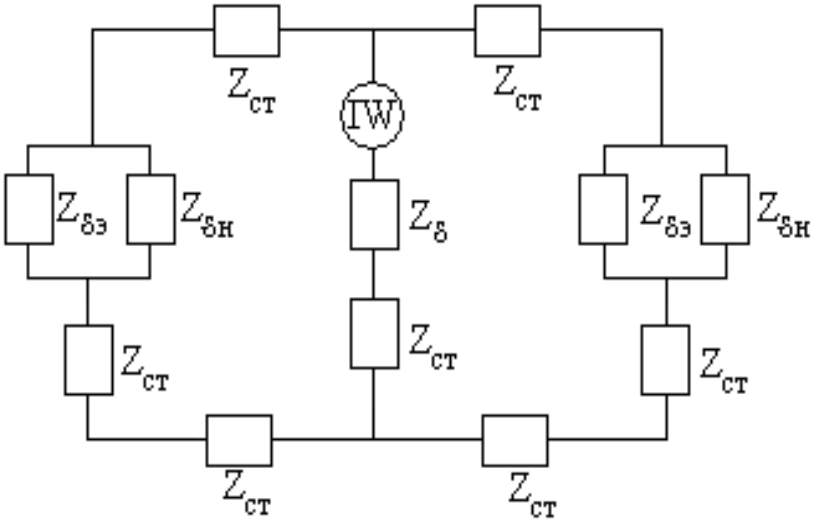


Рисунок 18 – Схема замещения магнитной цепи

Магнитное сопротивление центрального зазора

$$R_{\delta 1} = \frac{\delta_{ПР}}{\mu_0 \cdot a \cdot b} = \frac{0,2 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 16^2 \cdot 10^{-6}} = 0,6 \cdot 10^6 \text{ 1/Г}. \quad (192)$$

Магнитное сопротивление неэкранированной части рабочего зазора

$$R'_{\delta Н} = \frac{\delta_{ПР}}{\mu_0 \cdot a_Н \cdot b} = \frac{0,2 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 2,5 \cdot 16 \cdot 10^{-6}} = 4,0 \cdot 10^6 \text{ 1/Г}. \quad (193)$$

Магнитное сопротивление экранированной части рабочего зазора

$$R'_{\delta Э} = \frac{\delta_{ПР}}{\mu_0 \cdot a_Э \cdot b} = \frac{0,2 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 5 \cdot 16 \cdot 10^{-6}} = 2,0 \cdot 10^6 \text{ 1/Г}. \quad (194)$$

Сопротивление с учетом двух сторон магнитной цепи

$$R_{\delta H} = \frac{1}{2} \cdot R'_{\delta H} = \frac{1}{2} \cdot 4,0 \cdot 10^6 = 2,0 \cdot 10^6 \text{ 1/Г}, \quad (195)$$

$$R_{\delta Э} = \frac{1}{2} \cdot R'_{\delta Э} = \frac{1}{2} \cdot 10.3 \cdot 10^4 = 1,0 \cdot 10^6 \text{ 1/Г}. \quad (196)$$

Индуктивное сопротивление витка с учетом двух сторон магнитной цепи:

$$X_Э = \frac{1}{2} \cdot X_M = \frac{1}{2} \cdot 4,2 \cdot 10^3 = 2,1 \cdot 10^3 \text{ 1/Г}. \quad (197)$$

Амплитудное значение магнитного потока:

$$\Phi_m = \frac{U}{4,44 \cdot f \cdot w} = \frac{380}{4,44 \cdot 50 \cdot 3670} = 4,7 \cdot 10^{-4} \text{ Вб}, \quad (198)$$

Максимальная индукция равна:

$$B_m = \frac{\Phi_m}{a \cdot b \cdot k_{CT}} = \frac{4,7 \cdot 10^{-4}}{16^2 \cdot 10^{-6} \cdot 0,95} = 1,8 \text{ Т}. \quad (199)$$

По кривой намагничивания [6, с. 10, табл. 3] определяем значение напряженности H_m = 4000 А/м.

Определяем магнитные сопротивления стальных участков.

Полное удельное магнитное сопротивление:

$$\rho_Z = \frac{\sqrt{2} \cdot H_m}{B_m} = \frac{\sqrt{2} \cdot 4000}{1,8} = 3,1 \cdot 10^3 \text{ См/Г}, \quad (200)$$

Индуктивное удельное магнитное сопротивление:

$$\rho_X = \frac{2 \cdot P_{УД} \cdot \gamma}{\omega \cdot B_m{}^2} = \frac{2 \cdot 2,6 \cdot 7650}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 1,8^2} = 17,3 \text{ См/Г}, \quad (201)$$

где γ – плотность стали 3413, γ = 7650 кг/м^3;

$P_{УД}$ – удельные потери в стали. Для принятой стали удельные потери определяем по [6, с. 9, табл. 2], для этого берем удельные потери при ближайшем значении индукции по формуле

$$P_{УД} = P_{УД1} \cdot \left(\frac{B_m}{B_{m1}} \right)^2 = 0,8 \cdot \left(\frac{1,8}{1,5} \right)^2 = 1,2 \text{ Вт/кг}, \quad (202)$$

где $P_{УД1}$ = 0,8 Вт/кг, при индукции B_{m1} =1.5 Тл.[12]

Активное удельное магнитное сопротивление

$$\rho_r = \sqrt{\rho_Z{}^2 - \rho_X{}^2} = \sqrt{\left(3,2^2 \cdot 10^6 - 17,3^2\right)} = 3,1 \cdot 10^3 \text{ См/Г}. \quad (203)$$

Определяем среднюю длину пути магнитного потока

$$l_{CP} = 2 \cdot (H + c) + \pi \cdot a/2 = 2 \cdot (0,036 + 0,014) + \pi \cdot 0,016/2 = 0,125 \text{ м}. \quad (204)$$

Активное магнитное сопротивление стали

$$R_{\mu CT} = \rho_r \cdot \frac{l_{CP}}{S_{CT}} = 3,1 \cdot 10^3 \cdot \frac{0,125}{2,4 \cdot 10^{-4}} = 1,6 \cdot 10^6 \text{ 1/Г}, \quad (205)$$

где S_{CT} – сечение стали,

$$S_{CT} = a \cdot b \cdot k_{CT} = 15^2 \cdot 10^{-6} \cdot 0,95 = 2,4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2. \quad (206)$$

Индуктивное магнитное сопротивление стали

$$X_{\mu CT} = \rho_X \cdot \frac{l_{CP}}{S_{CT}} = 17,3 \cdot \frac{0,125}{2,4 \cdot 10^{-4}} = 18,9 \cdot 10^3 \text{ 1/Г}. \quad (207)$$

Полное магнитное сопротивление бокового зазора с экраном

$$Z_{\delta 2} = \frac{R_{\delta H} \cdot (R_{\delta Э} + jX_Э)}{R_{\delta H} + R_{\delta Э} + jX_Э} = 6,67 \cdot 10^5 + j \cdot 933,33 = 6,67 \cdot 10^5 \cdot e^{j0,08^\circ} \text{ 1/Г}. \quad (208)$$

Полное магнитное сопротивление цепи

$$Z_Э = R_{\delta 1} + Z_{\delta 2} + R_{\mu CT} + jX_{\mu CT} = 2,88 \cdot 10^6 + j \cdot 9,84 \cdot 10^3 = 2,88 \cdot 10^6 \cdot e^{j0,2^\circ} \text{ 1/Г}. \quad (209)$$

Потоки в экранированной и неэкранированной части бокового зазора

$$\Phi_{mH} = \Phi_m \cdot \frac{Z_{\delta 2}}{R_{\delta H}} = 1,56 \cdot 10^{-4} + j \cdot 2,18 \cdot 10^{-7} = 1,56 \cdot 10^{-4} \cdot e^{j0,08^\circ} \text{ Вб}, \quad (210)$$

$$\Phi_{mЭ} = \Phi_m \cdot \frac{Z_{\delta 2}}{R_{\delta Э} + jX_{\mu Э}} = 3,11 \cdot 10^{-4} - j \cdot 2,18 \cdot 10^{-7} = 3,11 \cdot 10^{-4} \cdot e^{-j0,04^\circ} \text{ Вб}. \quad (211)$$

Сдвиг фаз между потоками

$$\psi = \psi_1 + \psi_2 = 0,08^\circ - 0,04^\circ = -0,04^\circ. \quad (212)$$

Магнитодвижущая сила при конечном зазоре

$$(Iw)_m = \Phi_\delta \cdot Z_Э = 558,76 + j \cdot 1,91 = 558,76 \cdot e^{j0,2°} \text{ А.} \quad (213)$$

Ток в катушке

$$I = \frac{(Iw)_m}{\sqrt{2} \cdot w} = 0,108 + j \cdot 3,68 \cdot 10^{-4} = 0,108 \cdot e^{j0,2°} \text{ А.} \quad (214)$$

Мощность, выделяемая в катушке [6, с. 13]

$$P_К = I^2 \cdot r = 0,108^2 \cdot 350 = 4,06 \text{ Вт.} \quad (215)$$

Определяем поверхность охлаждения катушки [6, с. 13]

$$S_{ОХЛ} = \left(2(a+b) + 2 \cdot \pi \cdot \left(h_Н + \frac{a}{2}\right)\right) \cdot l_К = \left(2 \cdot 16 + 2 \cdot \pi \cdot \left(9 + \frac{16}{2}\right)\right) \cdot 28 \cdot 10^{-6} =$$

$$= 4,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2. \quad (216)$$

Рассчитываем превышение температуры катушки над температурой окружающей среды [6, с. 13]

$$\tau_К = \frac{P_{ОБ}}{К_{ТО} \cdot S_{ОХЛ}} = \frac{4,06}{12 \cdot 4,8 \cdot 10^{-3}} = 71 \text{ °С,} \quad (217)$$

где $К_{ТО}$ – коэффициент теплоотдачи, принимаем $К_{ТО}$ = 12 Вт/м^2·град [6, с. 13].

Потери в стали [6, с. 13]

$$P_{СТ} = \frac{1}{2} \cdot \omega \cdot \Phi_m^2 \cdot X_{\mu СТ} = \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot \left(4,7 \cdot 10^{-4}\right)^2 \cdot 8,9 \cdot 10^3 = 0,30 \text{ Вт.} \quad (218)$$

Потери в короткозамкнутом витке [6, с. 14]

$$P_Э = \frac{1}{2} \cdot \omega \cdot \Phi_{mЭ}{}^2 \cdot X_Э = \frac{1}{2} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot \left(3,1 \cdot 10^{-4}\right)^2 \cdot 2,1 \cdot 10^3 = 0,03 \text{ Вт.} \quad (219)$$

Таким образом из полученных данных видно, что расчетное превышение температуры обмотки над температурой окружающей среды составляет 71 °С, что меньше допустимого для принятого класса нагревостойкости В – 105 °С [11, с. 123, табл. П-8].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполнения задания на проектирование электрического аппарата был рассчитан магнитный пускатель переменного тока на 40 А, с рабочим напряжением 380 В.

Для расчётов было использовано программное обеспечение Mathcad 15.0, что позволило добиться наиболее точных результатов расчёта, в качестве графического редактора, для выполнения чертежей и спецификации, использовался Компас-3D v.14.

Токоведущий контур выбран из условия допустимого нагрева шин и не размыкающих контактных соединений при длительно протекающем номинальном токе, что обеспечивает длительный срок службы магнитного пускателя без замены элементов токоведущего контура.

Расчет контактов показывает, что температура размыкания контактных соединений не достигает температуры рекристаллизации, что обеспечивает его надёжную работу. Материал контактов – серебро, окись кадмия с мелкодисперсной структурой КМК-А10м, что обеспечивает высокую износостойкость контактов.

Спроектированный пускатель отвечает всем поставленным в техническом задании требованиям.